

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

Dipartimento di Ingegneria di Chimica, dei Materiali e della
Produzione Industriale

**29° CICLO DEL DOTTORATO DI RICERCA IN
“INGEGNERIA DEI PRODOTTI E DEI PROCESSI
INDUSTRIALI”**

TESI DI DOTTORATO

**STUDIO E SIMULAZIONE DEL PROCESSO DI
DEFORMAZIONE PLASTICA DI LAMINAZIONE DI
LAMIERE SOTTILI**

Tutor:
Prof. Ing. Antonio Langella

Candidato:
Ing. Rocco Di Palma

Data: 21/02/2017

Anno Accademico 2017

Ringraziamenti

In primis vorrei ringraziare il Prof. Antonio Langella, non solo per la fiducia accordatami accettando il ruolo di Relatore per questo lavoro di tesi, ma soprattutto per avermi introdotto alla professione di Ingegnere, già durante lo svolgimento dello tesi Specialistica.

L' Ing. Ciro Sinagra e la Laminazione Sottile Spa che mi ha dato l'opportunità di interfacciarmi con una realtà industriale che è tra le più importanti nel panorama Internazionale del settore oltre ad essere un motivo di vanto per la nostra Campania.

Il ringraziamento doveroso e caloroso è per mia moglie Francesca, che con amore pazienza e fiducia mi ha sostenuto nei momenti più importanti di questi tre lunghi anni nei quali sono nati anche i nostri due figli Sebastiano ed Eliana.

I tre miei amici e soci della Sòphia High Tech srl., Antonio, Pierluigi e Raffaele con i quali quotidianamente condivido la vita lavorativa.

Ringrazio gli amici della "Soffitta" del DICMAPI per l'accoglienza al dipartimento durante il primo periodo del dottorato e per il continuo supporto e l' instancabile disponibilità.

La Dott.ssa Paola Desidery per l'infinita pazienza e la dedizione professionale con la quale mi ha supportato durante tutti gli anni del dottorato.

Infine Valerio Ametrano del quale sono stato correlatore del suo lavoro di tesi specialistica, per essere stato in ogni momento disponibile dandomi degli spunti fondamentali dal punto di vista Ingegneristico.

Grazie a tutti.

Indice

INTRODUZIONE.....	1
Panoramica sulla Laminazione sottile.....	2
1 IL PROCESSO DI LAMINAZIONE	3
1.1 Introduzione.....	3
1.2 Il laminatoio.....	6
1.2.1 <i>L'impianto produttivo della Laminazione sottile</i>	<i>11</i>
1.3 Teoria della laminazione a caldo.....	15
1.3.1 <i>Arco di contatto e influenza del raggio dei cilindri.....</i>	<i>17</i>
1.3.2 <i>Sezione neutra.....</i>	<i>19</i>
1.3.3 <i>Condizione di imbocco e trascinamento</i>	<i>21</i>
1.4 Difetti di laminazione.....	24
1.5 Profilo di spessore del laminato: Crown.....	27
1.5.1 <i>Fenomeni di influenza del Crown</i>	<i>29</i>
2 ANALISI STATISTICA	36
2.1 Introduzione.....	36
2.2 Panoramica della produzione.....	38
2.3 Selezione dei dati	40
2.4 Costruzione delle carte di controllo.....	43
2.5 Risultati delle carte di controllo	46
2.6 Correlazioni numeriche	48

3	ANALISI NUMERICA	53
3.1	Introduzione	53
3.2	Simufact forming.....	54
3.3	Ipotesi	55
3.4	Tipologia di analisi.....	56
3.5	Scelta dei passi e scheda di laminazione	57
3.6	Condizioni di simmetria	59
3.7	Costruzione del modello.....	62
3.8	Costruzione delle geometrie	64
3.9	Discretizzazione (Meshing).....	72
3.9.1	<i>Descrizione degli elementi</i>	<i>76</i>
3.9.2	<i>Caratteristiche dei materiali</i>	<i>77</i>
3.9.3	<i>Leggi del moto.....</i>	<i>79</i>
3.9.4	<i>Tabella dei contatti</i>	<i>82</i>
3.9.5	<i>Attrito</i>	<i>84</i>
3.9.6	<i>Attributi termici.....</i>	<i>86</i>
3.10	Parametri di simulazione	89
3.10.1	<i>Time step</i>	<i>89</i>
3.10.2	<i>Stage control</i>	<i>90</i>
3.10.3	<i>Particelle di controllo</i>	<i>91</i>
3.11	Risultati dell'analisi numerica.....	92
3.12	Modello in Marc/Mentat.....	98
3.12.1	<i>Caratteristiche Modello</i>	<i>99</i>

Indice

3.12.2	<i>Contatti</i>	102
3.12.3	<i>Parametri di Processamento</i>	104
3.12.4	<i>Risultati</i>	105
4	CONCLUSIONI	107
	APPENDICE	109
A.1	Carte di controllo	109
a.	Lega 1050	109
b.	Lega 1200	110
c.	Lega 1230	111
d.	Lega 3005	112
e.	Lega 3105	114
f.	Lega 4006	115
g.	Lega 5052	116
h.	Lega 5754	117
i.	Lega 8006	118
j.	Lega 8009	119
k.	Lega 8011	122
l.	Lega 8079	124
A.2	Profili di spessore analisi numerica: Passo 22	126
A.3	Profili di spessore analisi numerica: Passo 23	127
A.4	Profili di spessore analisi numerica: Passo 24	129
	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	133

Indice delle figure

Figura 1.1 – Tipologie di prodotti laminati	5
Figura 1.2 – Tipi di laminatoi.....	6
Figura 1.3 – Gabbia di laminazione.....	8
Figura 1.4 – disegno costruttivo dello sbozzatore e del sistema di azionamento dei cilindri.....	9
Figura 1.5 – Schema semplificato del sistema di refrigeramento	10
Figura 1.6 – Particolare dei cilindri di lavoro e del cilindro di sostegno inferiore durante la fase di messa in opera dell'impianto [14]	11
Figura 1.7 – Laminatoio reversibile.....	12
Figura 1.8 – Laminatoio sbozzatore [1]	12
Figura 1.9 – particolare della rulliera con il sistema di cesoiamento delle “code” [1]	13
Figura 1.10 – Quadro comandi sbozzatore [1]	14
Figura 1.11 – Vista laterale ed in pianta del semilavorato in laminazione	15
Figura 1.12 – Schema illustrativo del fenomeno della ricristallizzazione	16
Figura 1.13 – Variazione dell’arco di contatto al variare del raggio dei cilindri	17
Figura 1.14 – Allargamento del laminato in funzione del diverso raggio dei cilindri..	18
Figura 1.15 – Velocità V_0 di ingresso e V_f di uscita	19
Figura 1.16 – Curve di velocità Ideale (1) e Reale (2) del materiale	20
Figura 1.17 – Forze di attrito.....	21
Figura 1.18 – Condizione di imbocco.....	22
Figura 1.19 – Difetto di forma: Ondulazione dei bordi.....	24
Figura 1.20 – Difetto di forma Cerniere a centro nastro	25
Figura 1.21 – Difetto di forma: coda di alligatore.....	25
Figura 1.22 – Difetto di forma: Alligating (coda di alligatore)	26
Figura 1.23 – Crown: Valutazione del profilo di spessore	27
Figura 1.24 – Flessione Cilindri	30
Figura 1.25 – Tipologie di bombatura.....	31
Figura 1.26 – Schema dilatazione termica cilindro bombato.....	33
Figura 1.27 – Schema semplificato del fenomeno di dilatazione non uniforme dei cilindri.....	34
Figura 1.28 – Roll bending.....	35
Figura 2.1 – Schermata del software IBA analyzer	37
Figura 2.2 – Esempio di file .csv esportato dal sistema IBA	37
Figura 2.3 – Mix produttivo per lega	40

Figura 2.4 – Istogramma delle frequenze.....	44
Figura 1.1 – FEM: discretizzazione del dominio.....	53
Figura 3.2 – Schema funzionamento software FEM.....	54
Figura 1.3 – Application module.....	55
Figura 1.4 – Legame σ - ϵ per un materiale a comportamento elastico senza incrudimento	57
Figura 1.5 – Esempio di scheda di laminazione lega 8009	59
Figura 1.6 – Schema simmetrico del modello.....	61
Figura 1.7 – Application module.....	62
Figura 1.8 – Albero dinamico di Simufact forming 12.0	63
Figura 1.9 – Schermata “inventario” di Simufact forming 12.0	63
Figura 1.10 – Disegno costruttivo del semi-cilindro di lavoro.....	65
Figura 1.11 – modello 3D del semi-cilindro di lavoro	65
Figura 1.12 – Disegno costruttivo del semi-cilindro di sostegno	66
Figura 1.13 – Modello 3d del semi-cilindro di sostegno.....	66
Figura 1.14 – Modello 3d del supporto	68
Figura 1.15 – Modello 3d della ruota motrice	69
Figura 1.16 – Pusher	70
Figura 1.17 – Function: Geometry-From File	70
Figura 1.18 – Albero dinamico	70
Figura 1.19 – Deformable die Function.....	71
Figura 1.20 – Schermata del tool Roll Forming.....	73
Figura 1.21 – Laminato.....	74
Figura 1.22 – Discretizzazione del cilindro di lavoro e refinement box.....	75
Figura 1.23 – Elemento Brick Type 7	76
Figura 1.24 – Type 157	76
Figura 1.25 – Tabella rotazione cilindri per Passo 22	80
Figura 1.26 – Movimento pusher	81
Figura 1.27 – Assegnazione movimenti	81
Figura 1.28 – Finestra della contact table di Simufact forming	83
Figura 1.29 – Definizione della legge di attrito in Simufact forming.....	85
Figura 1.30 – Dettaglio dell’albero dinamico	85
Figura 1.31 – Finestra di definizione degli attributi termici	87
Figura 1.32 – Finestra di definizione degli attributi termici per i “dies”	88
Figura 1.33 – Stage control	91
Figura 1.34 – Definizione delle particelle di controllo per il passo 24.....	92

Figura 1.35 –Dati particelle	93
Figura 1.36 – Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24	97
Figura 1.37 – Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24	98
Figura 1.38 – Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24	99
Figura 1.39– Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24	100
Figura 1.40– Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24	100
Figura 1.41– Motore.....	101
Figura 1.41– Contatti.....	102
Figura 1.41– Proprietà dei corpi di contatto	103
Figura 1.41– Proprietà dei corpi di contatto	103
Figura 1.41– Metodo di Contatto	104
Figura 1.41– Displacement lungo Y	105
Figura 1.41–Nodi per rilevazione spessore	105
Figura 1.41– Profilo Laminato	106
Figura 4.1 – Apertura gap cilindri - AGC	108
Figura A.1 – Legenda	109

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 – Gabbia di laminazione: Componenti	8
Tabella 1.2 – Parametri di targa del Laminatoio	11
Tabella 1.3 – Valori di camber dei cilindri presso Laminazione Sottile S.p.A.	32
Tabella 2.1 – Produzione 2014.....	38
Tabella 2.2 – Produzione 2014 per tipologia di lega.....	39
Tabella 2.3 – Dettaglio della produzione dopo la selezione dei dati	42
Tabella 2.4 – Spessori ultimi di sbazzatura	44
Tabella 2.5 – Classi di larghezza	45
Tabella 2.6 – Tabella riepilogativa dei risultati delle carte di controllo	47
Tabella 2.7 – Percentuale di nastri fuori specifica	48
Tabella 2.8 – Indici di correlazione	50
Tabella 1.1 – Scheda di laminazione lega 8009: ultimi 3 passi.....	58
Tabella 1.2 – dimensioni del semi-laminato.....	67
Tabella 1.3 – dimensioni del supporto cilindro.....	67
Tabella 1.4 – dimensioni della piastra di spinta (pusher)	69
Tabella 1.5 – Gap di laminazione	72
Tabella 1.6 – Posizione delle geometrie lungo Y.....	72
Tabella 1.7 – Caratteristiche materiale lega 8090	77
Tabella 1.8 – Caratteristiche Acciaio cilindro	79
Tabella 1.9 – Tempi di laminazione	80
Tabella 1.10 – Tabella dei contatti.....	83
Tabella 1.11 – Attributi termici del laminato	87
Tabella 1.12 – Attributi termici del cilindro di lavoro	88
Tabella 1.13 – Time step per ciascun passo	90
Tabella 1.14 – Campionamento spessori passo 22.....	94
Tabella 1.15 – Campionamento spessori passo 23.....	95
Tabella 1.16 – Campionamento spessori passo 24.....	96

INTRODUZIONE

L'attività di dottorato ha avuto come oggetto lo studio del processo di laminazione a caldo di una brama di alluminio, con lo scopo di realizzare un modello agli elementi finiti per verificare l'applicabilità dell'analisi numerica al processo di laminazione ed in particolare per la predizione del valore del fenomeno del *Crown*.

La necessità di una standardizzazione dimensionale e il miglioramento della qualità dei prodotti laminati, ha spinto i responsabili aziendali di Laminazione Sottile Spa ad aprire un filone di ricerca che punti lo sguardo sulla variazione del profilo di spessore dei nastri di alluminio. L'intento ultimo è stato quello di individuare i fattori che influenzano tale variazione, in maniera tale da controllare più efficacemente l'intero processo di produzione.

In una prima parte lo studio del processo è stato condotto mediante la costruzione di carte di controllo, opportunamente sviluppate per ciascuna categoria di lega analizzata, dalle quali è stata ricavata una istantanea dello stato della produzione per l'anno 2014 dell'impianto sbozzatore. Il lavoro ha coinvolto l'elaborazione dei parametri di processo di circa 13000 nastri di alluminio. Lo studio si è poi spinto alla ricerca di correlazioni tra i parametri di produzione e la deviazione del profilo di spessore (*crown*).

Nella seconda parte del lavoro di dottorato è stato studiato l'aspetto simulativo. Sono state utilizzate le informazioni ricavate dalla prima fase e le esperienze dirette sull'impianto, per la modellazione del processo di laminazione. La costruzione del modello agli elementi finiti è stata sviluppata con l'ausilio del software *Simufact Forming 12.0*.

Tale software, rispetto ad altri codici commerciali, ha il vantaggio di essere specificatamente pensato per la simulazione di processi produttivi inerenti le lavorazioni dei metalli. Ciò ha permesso una più rapida implementazioni delle condizioni reali di laminazione all'interno del modello FEM. In particolare sono stati

considerati i fenomeni di flessione del cilindro di lavoro e l'influenza della temperatura di lavorazione sul meccanismo di deformazione del metallo.

Nell'ultima parte dell'attività, è stato realizzato un nuovo modello FEM comparativo utilizzando i software MARC/MENTAT.

Panoramica sulla Laminazione sottile

L'attività di Dottorato è stata svolta presso la sede centrale della società sita nella località di San Marco Evangelista (Caserta). Fondata nel 1923, Laminazione Sottile è l'azienda madre del Gruppo Laminazione Sottile, di cui fanno parte anche *Contital*, *I2R* ed *Italcoat*. In origine il core business dell'azienda era la produzione di capsule e tubi per dentifricio, per poi avviare negli anni un processo di integrazione verticale, introducendo la laminazione dell'alluminio. Ad oggi le aziende del Gruppo producono coils di alluminio in diverse forme, leghe e trattamenti superficiali, incluso verniciatura e stampa, oltre alla produzione di vaschette di alluminio per uso alimentare.

La laminazione sottile ha un importante profilo internazionale, con oltre il 60% della produzione assorbito dai mercati esteri. Ha tra i suoi clienti grandi gruppi internazionali in Europa, soprattutto in Germania, Francia, Paesi nordeuropei, Inghilterra, ma è anche molto presente in Australia, nel Far East (Cina, Singapore, Thailandia) e nei Paesi Arabi.

CAPITOLO 1

IL PROCESSO DI LAMINAZIONE

1.1 Introduzione

La laminazione è un processo per deformazione plastica mediante il quale si effettua una riduzione di spessore o, più in generale, una modifica della sezione di un semilavorato metallico, attraverso la pressione combinata di due utensili controrotanti aventi la forma di un solido di rotazione, chiamati *cilindri* di laminazione.

È un processo antico risalente al 1500 che negli anni è rimasto concettualmente invariato nel suo svolgimento, mentre l'evoluzione tecnologica degli impianti di produzione, ha permesso di ottenere prodotti laminati con caratteristiche geometriche e meccaniche sempre migliori.

Il processo di laminazione è di fondamentale importanza nell'industria moderna per la produzione di massa di semilavorati e prodotti finiti, infatti rappresenta da solo il 90% di tutti i processi di lavorazione per deformazione plastica dei metalli eseguiti al mondo. La maggior parte degli oggetti metallici con cui si ha a che fare quotidianamente, ha subito nella fase iniziale del proprio ciclo produttivo, un processo di laminazione.

A seconda delle condizioni nelle quali si effettua il processo, si può parlare di:

- Laminazione a caldo
- Laminazione a freddo

I due processi sono solitamente consequenziali. Il primo, eseguito a temperature elevate, permette di effettuare una grossa riduzione di spessore del semilavorato,

trasformando i lingotti provenienti dalla fonderia o dalla colata continua in *blumi*¹ o *billette*², per questo motivo il processo di laminazione a caldo è anche definito come “*sbozzatura*”.

Con il secondo, si effettua un'operazione di finitura dimensionale e superficiale, in cui i semilavorati provenienti dal precedente processo, possiedono una sezione molto prossima a quella finale.

A seconda della forma e della tipologia di cilindri, possiamo distinguere:

- Laminazione su tavola piana (flat rolling)
Le generatrici dei rulli sono rettilinee, il processo è esclusivamente finalizzato alla riduzione dello spessore del laminato. Il prodotto in uscita è quindi un semilavorato destinato a subire ulteriori lavorazioni.
- Laminazione con calibri (shape rolling)
Le generatrici dei rulli presentano un profilo opportunamente progettato e il laminato subisce a ogni passaggio tra i rulli una variazione più o meno complessa dell'intera geometria della sezione trasversale.

Un esempio delle varie tipologie di prodotti ottenibili con la laminazione è riportato nella Figura 1.1:

¹ Blumi: semilavorati metallici a sezione rettangolare destinati alla fabbricazione di lamiere o nastri.

² Billette: semilavorati a sezione quadrata, utilizzati per la laminazione con calibri mediante i quali si ottengono profilati, fili o tubi non saldati.

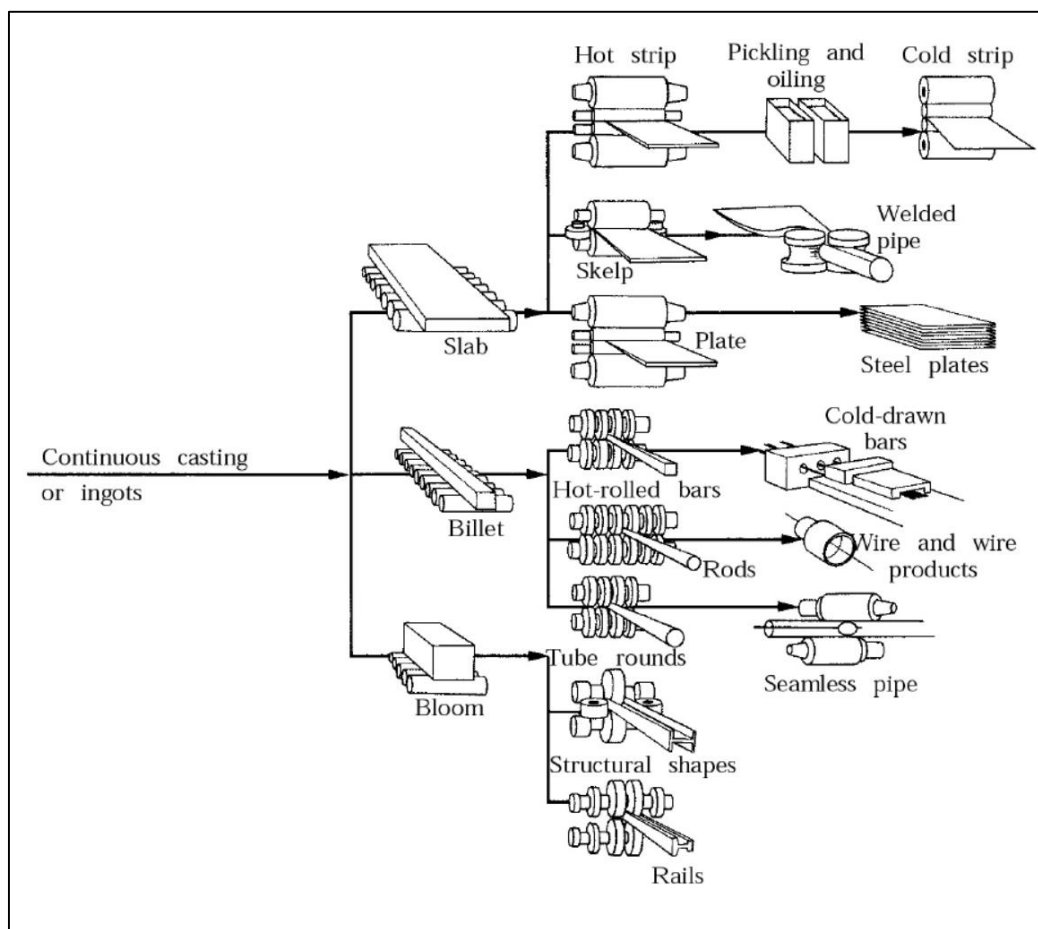


Figura 1.1 – Tipologie di prodotti laminati

1.2 Il laminatoio

Esistono diverse tipologie di laminatoi impiegati per la laminazione in piano, essi si differenziano per il numero di cilindri presenti nella gabbia di laminazione, e sono:

- a) Duo (*two-high mills*)
- b) Trio (*Three-high mills*)
- c) Quarto (*Four-high mills*)
- d) Cluster (*Sendzimir*)

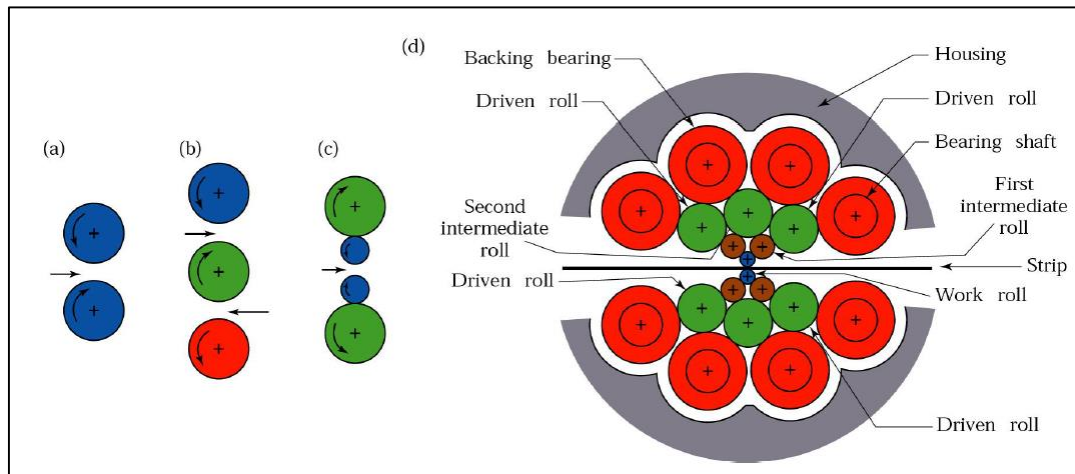


Figura 1.2 – Tipi di laminatoi

Per effettuare le successive riduzioni di spessore, l'impianto di laminazione può essere costituito da un *treno di laminazione*, consistente in una successione di laminatoi con *gap*³ tra i cilindri decrescente. In ogni portale viene effettuata una riduzione spessore. Questa tipologia di impianti è solitamente utilizzata per la laminazione continua, in cui il materiale fuso viene fatto solidificare direttamente su dei cilindri iniziali raffreddati

³ GAP: Termine anglofono per indicare la luce tra i cilindri, attraverso la quale è costretto a passare il laminato in lavorazione.

ad acqua, e successivamente imboccato nel treno di laminazione al termine del quale è presente un sistema di avvolgimento e/o tranciamento del laminato.

Quando le dimensioni dell'impianto non consentono lo sviluppo del treno di laminazione, si ricorre ai *laminatoi reversibili*. Questa tipologia di macchine è capace di invertire il verso di rotazione dei cilindri e di regolare la luce tra essi in tempo reale. In questo caso il lingotto, di lunghezza finita, attraversa alternativamente la gabbia di laminazione, prima in un verso e poi nell'altro, per poi essere avvolto su di un aspo, una volta raggiunto lo spessore di *target*.

Una macchina reversibile di questo tipo è dotata di sistemi di controllo automatici molto più sofisticati rispetto a quelli presenti nel treno di laminazione e permette di limitare lo sviluppo orizzontale dell'impianto.

In particolare ci si soffermerà sulla descrizione del *laminatoio quarto reversibile*, della stessa tipologia di quello presente nell'impianto di sbazzatura della *Laminazione Sottile s.p.a.*

Tale macchina di laminazione (*vedi Figura 1.3*) è costituita da due portali (uno destro e uno sinistro) fissati al telaio di base. Questo è a sua volta costituito da una coppia di massicce "scarpe" (9) direttamente ancorate alla fondazione. Ogni portale è un monoblocco formato da due colonne dette "spalle".

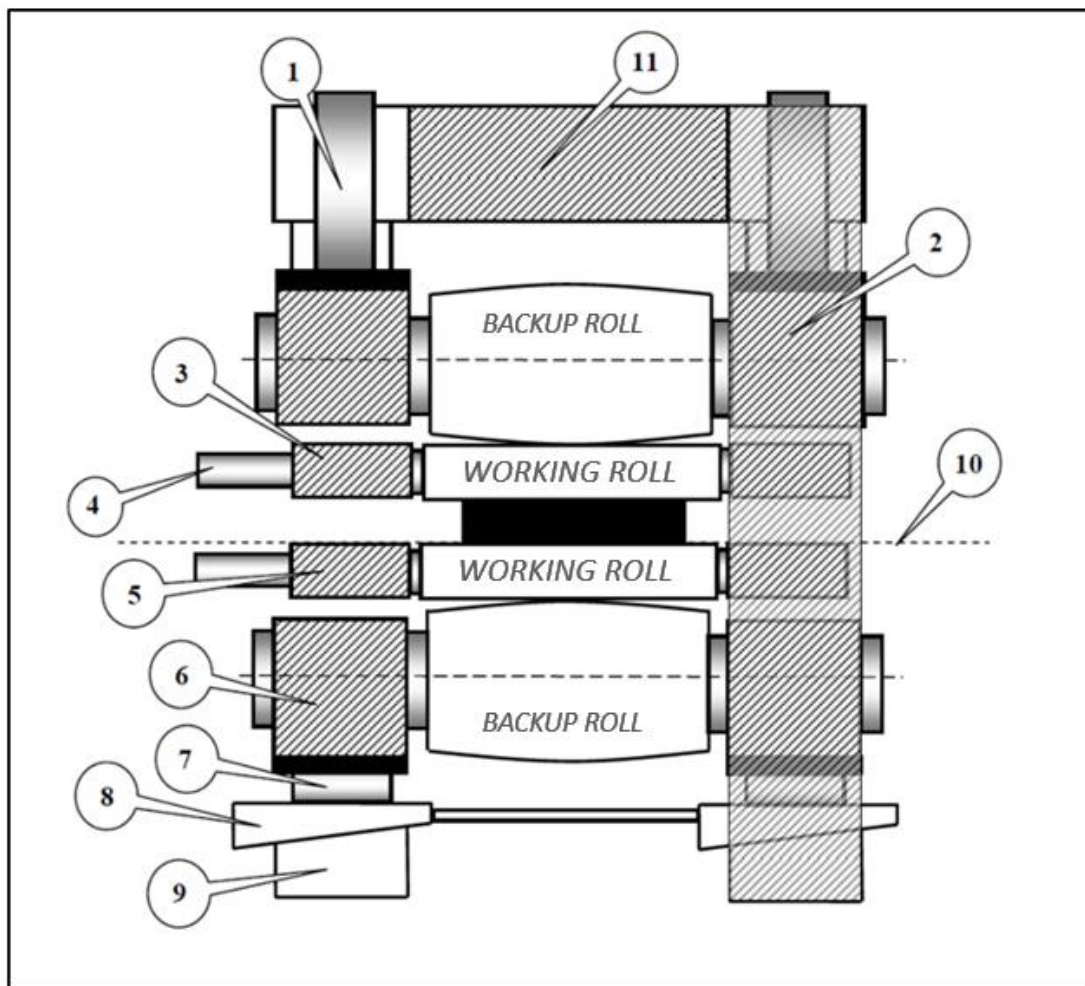


Figura 1.3 – Gabbia di laminazione

1	Vitone	7	Capsule idrauliche
2	Guarnitura cil. di sostegno sup.	8	Cunei
3	Guarnitura cil. di lavoro sup.	9	Scarpe
4	Allunghe	10	Passline
5	Guarnitura cil. di lavoro inf.	11	Traversa superiore
6	Guarnitura cil di sostegno inf.		

Tabella 1.1 – Gabbia di laminazione: Componenti

In basso, le spalle sono collegate a due a due dalle scarpe, un ulteriore elemento detto “traversa” (11) collega i due portali nella parte superiore unendo le due metà della

struttura del laminatoio. Tra i due portali sono poi fissati i 4 cilindri che costituiscono la gabbia di laminazione.

I cilindri di lavoro (*working rolls*), sono fisicamente a contatto con il materiale in lavorazione, hanno un diametro minore per ridurre l'arco di contatto e di conseguenza il carico di laminazione necessario alla lavorazione. La finitura superficiale dei cilindri di lavoro è determinante per le caratteristiche della superficie del laminato.

I cilindri di supporto (*backup rolls*) hanno al contrario un diametro maggiore, una volta e mezza quelli di lavoro, e sono realizzati in una lega più tenera, in maniera tale da non trasferire eventuali difetti superficiali ai cilindri di lavoro. Il compito dei cilindri di supporto è di conferire rigidità alla gabbia e limitare l'inflessione dovuta al carico di laminazione. Entrambi i tipi di cilindri sono "a tavola piana", ossia con una superficie di lavoro liscia priva di calibri.

Il moto ai cilindri è trasmesso dalle *allunghe* le quali lo derivano dallo *sdoppiatore* azionato dal motore elettrico a corrente continua, capace di erogare circa 5000 [CV] di potenza.

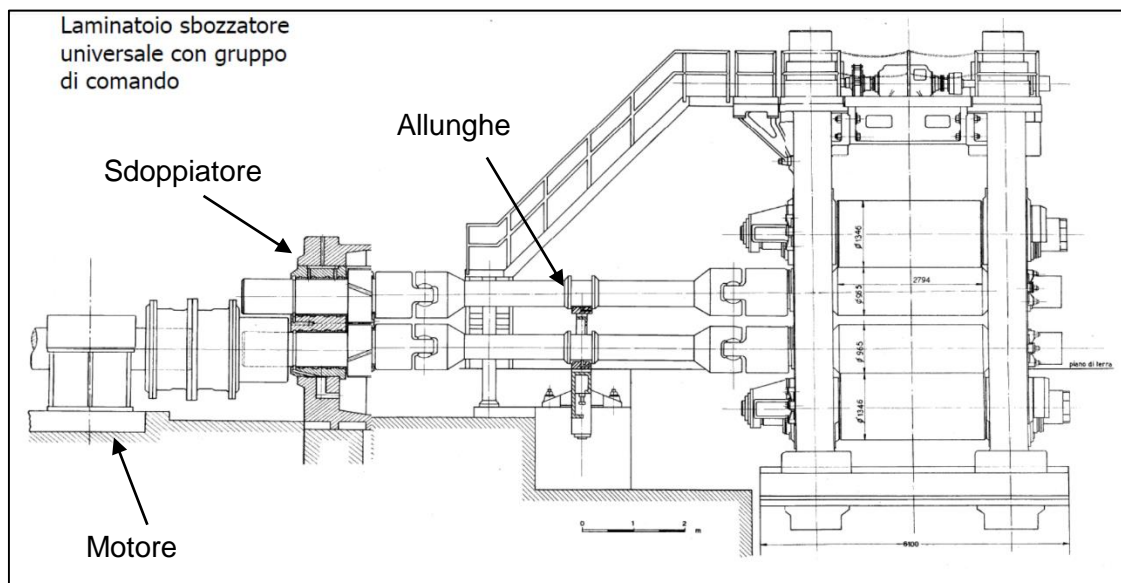


Figura 1.4 – disegno costruttivo dello sbizzatore e del sistema di azionamento dei cilindri

Il carico di laminazione (*rolling load*), viene realizzato utilizzando una coppia di robuste viti, dette appunto *vitoni* (1) (Figura 1.3), posizionate ciascuna all'interno di ogni spalla,

con il compito di esercitare pressione sulla guarnitura superiore dei cilindri di sostegno (2) (Figura 1.3)., Il carico applicato a ciascuna spalla si trasmette attraverso i cilindri al materiale da laminare, quindi passa al cilindro inferiore per scaricarsi poi tramite la guarnitura inferiore (6) (Figura 1.3).

Col passare degli anni si sono avuti enormi sviluppi dell'oleodinamica che hanno consentito di utilizzare speciali cilindri oleodinamici di grosso diametro e piccola corsa, dette capsule idrauliche (7) (Figura 1.3), in grado di realizzare i grossi carichi necessari per produrre il carico di laminazione.

Gli impianti di sbozzatura sono inoltre dotati di un sistema di lubro-refrigerazione dei cilindri, necessario a limitare le dilatazioni termiche dovute al contatto con il metallo ad alta temperatura. La refrigerazione è effettuata con un'emulsione al 95% di acqua e il 5% di olio (paraffine e altri additivi specifici).

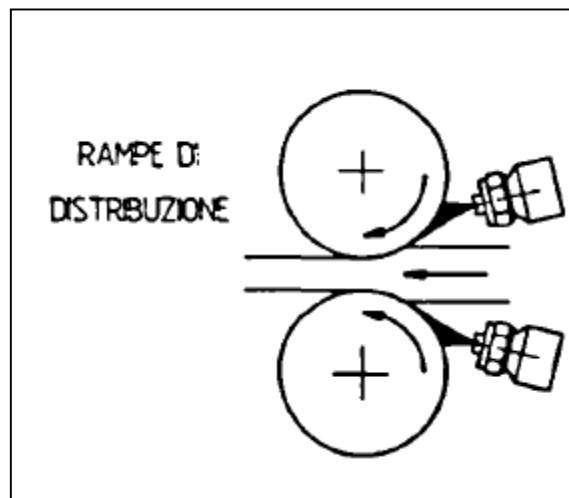


Figura 1.5 – Schema semplificato del sistema di refrigeramento

1.2.1 L'impianto produttivo della Laminazione sottile

L'impianto sbozzatore presente presso la Laminazione Sottile S.P.A, oggetto di questo studio, è un laminatoio reversibile di tipo *Quarto* della *Mino S.p.a*, inaugurato nel 1998, con le seguenti caratteristiche di targa:

***Four-High Reversing Hot Rolling Line with Double Coilers
Series 1XXX, 3XXX, 5XXX and 8XXX***

<i>Max. Strip width</i>	2300 mm
<i>Entry Slab size</i>	600 x 2300 x 5000 mm
<i>Min. exit Thickness</i>	3 mm
<i>Max Coil weight</i>	18 t
<i>Max. rolling force</i>	4000 t
<i>Max. rolling speed</i>	250 m/min.

Tabella 1.2 – Parametri di targa del Laminatoio

Il laminatoio è dotato di due cilindri di lavoro (*working rolls*) e due cilindri di supporto (*backup rolls*).

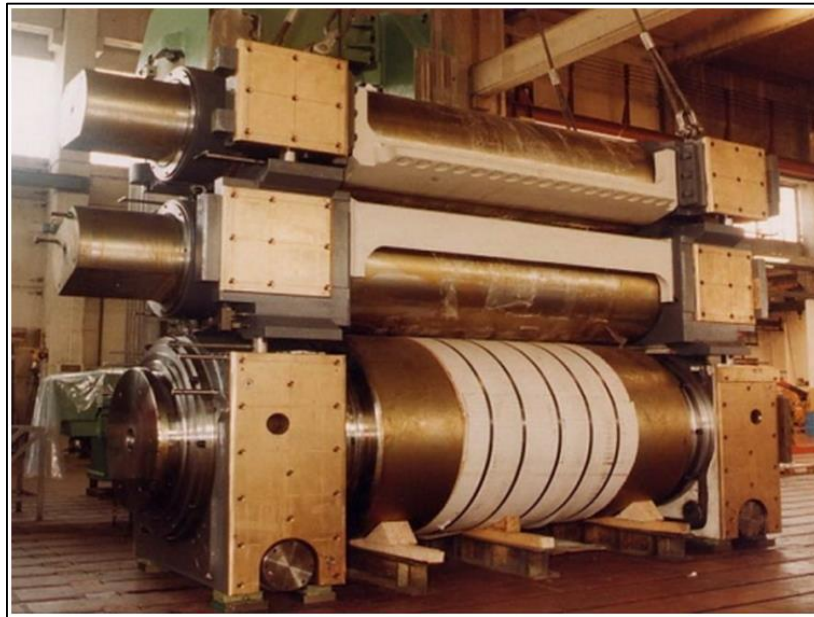


Figura 1.6 – Particolare dei cilindri di lavoro e del cilindro di sostegno inferiore durante la fase di messa in opera dell'impianto [14]

Lo sbozzatore è definito reversibile poiché permette l'inversione di marcia dei cilindri. In questo modo il laminato in lavorazione attraversa la luce tra i cilindri, prima in una direzione e poi nell'altra, riducendo lo spessore ad ogni passo fino a raggiungere il valore finale imposto dalla lavorazione.

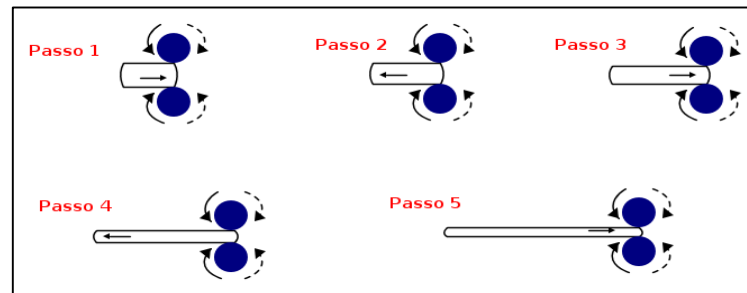


Figura 1.7 – Laminatoio reversibile

Tale sistema permette di limitare lo spazio necessario all'impianto rispetto ad un sistema a "treno continuo".

Il laminatoio *sbozzatore* è così definito poiché realizza il grosso della riduzione di spessore, "sbozzando" appunto il prodotto di fonderia in ingresso, dalle dimensioni iniziali di circa 900-1300 [mm] di larghezza per 610[mm] altezza e 5000[mm] di lunghezza, in nastri di alluminio di spessore compreso tra i 3-7[mm], di 1300-2100[mm] di larghezza per oltre 400[m] di lunghezza.



Figura 1.8 – Laminatoio sbozzatore [1]



Figura 1.9 – particolare della rulliera con il sistema di cesoimento delle “code” [1]

Data l’elevata temperatura di lavorazione, vi è la necessità di controllare la temperatura dei cilindri di lavoro, mediante un opportuno **sistema di refrigerazione**.

L’impianto è costituito da una serie di ugelli che spruzzano sui cilindri una emulsione di acqua e olio. Tale emulsione, nel caso di laminazione dell’alluminio, ha anche il compito di lubrificare le superfici e ridurre l’attrito tra laminato e cilindri.

Il laminatoio è dotato, inoltre, di un sistema di controllo automatico, *Automatic Gauge Control (AGC)*, che regola ad ogni passo la distanza tra i cilindri, in maniera tale da ottenere una determinata riduzione definita nella scheda di laminazione.

A seconda dello spessore finale da raggiungere e del tipo di lega in lavorazione, sono necessari dai 22 ai 30 passi di laminazione. L’avanzamento del materiale sulla rulliera è comandato in manuale da un operatore nella sala di controllo, situata su un pulpito in posizione rialzata rispetto all’impianto.



Figura 1.10 – Quadro comandi sbizzatore [1]

Dal quadro comandi in Figura 1.10, l'operatore può supervisionare qualsiasi parametro della macchina ed eventualmente intervenire manualmente sul processo. Attraverso il software di gestione *Achembach*, può ad esempio modificare i parametri di un passo di laminazione, o inserire un passo aggiuntivo alla scheda di lavoro prestabilita a seconda delle esigenze. Inoltre tutti i dati della macchina riguardanti le singole lavorazioni, vengono importati e registrati attraverso l'utilizzo di uno strumento software (IBA) che si interfaccia tramite opportuni moduli al sistema di regolazione. L'IBA è dotato di un tool che consente di rappresentare mediante opportuni grafici l'andamento dei vari parametri che caratterizzano il controllo automatico di spessore.

1.3 Teoria della laminazione a caldo

Come accennato, lo scopo della laminazione a caldo è di trasformare un prodotto di fonderia (*lingotto o placca*), attraverso successive operazioni di riduzione di spessore, in un nastro sottile avente determinate caratteristiche geometriche, meccaniche, superficiali e metallurgiche.

Nella laminazione in piano, la riduzione di spessore viene effettuata costringendo il prodotto di fonderia a passare attraverso la luce delimitata da due cilindri controrotanti. L'insieme dei cilindri è detta gabbia di laminazione.

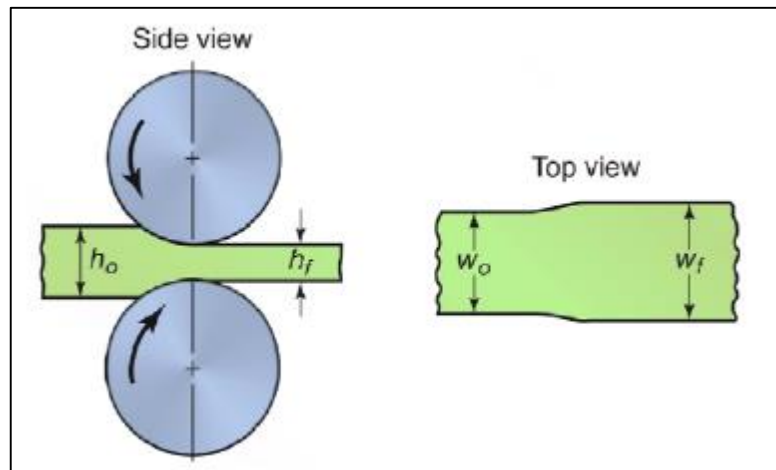


Figura 1.11 – Vista laterale ed in pianta del semilavorato in laminazione

Il metallo viene deformato dalla pressione dei rulli contro la superficie della placca, che provoca un stato tensionale di compressione ed una conseguente riduzione dell'altezza. Tale riduzione, per la costanza del volume, genera a sua volta un allargamento ed allungamento del semilavorato ad ogni passo, in maniera tale che sia sempre rispettata la relazione:

$$h_0 \cdot w_0 \cdot l_0 = h_f \cdot w_f \cdot l_f$$

$$h_0 < h_f \qquad w_0 > w_f \qquad l_0 > l_f$$

Il termine “*a caldo*” sottolinea che tale lavorazione avviene ad una temperatura particolare per i materiali metallici, detta *Temperatura di ricristallizzazione*,

solitamente coincidente con i 2/3 della temperatura di fusione. Per le leghe di alluminio tale temperatura varia tra i 400° e 600°C. A questa temperatura il materiale subisce un minore incrudimento dovuto alla maggiore velocità di ricristallizzazione della struttura. Ciò permette di effettuare maggiori riduzioni di spessore ad ogni passo, a parità di carico di laminazione e di potenza assorbita dai motori.

Al vantaggio conseguente al minor lavoro e spesa di energia, si oppone la presenza di fenomeni di ritiro del materiale, a causa dei quali la lavorazione tende ad essere meno precisa e con una finitura superficiale minore rispetto ad una laminazione a freddo.

Il fenomeno della ricristallizzazione è favorito dall'azione meccanica dei rulli, unita all'effetto del calore. I grani cristallini frantumandosi, passano da una microstruttura a grana grossa non uniforme, tipica dei prodotti di fonderia, a una microstruttura a grana più fine e regolare, con conseguente miglioramento delle caratteristiche meccaniche, com'è noto dalla relazione di *Petch-Hall*⁴.

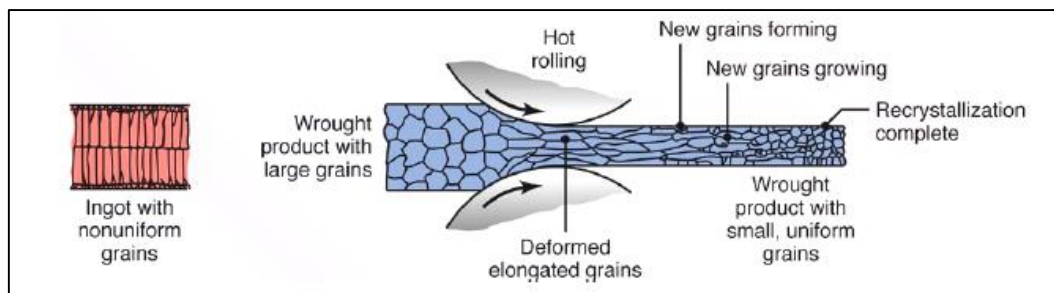


Figura 1.12 – Schema illustrativo del fenomeno della ricristallizzazione

Inoltre lo sforzo di laminazione causa uno stiramento dei grani nella direzione di laminazione, il che comporta un certa anisotropia del materiale lavorato, che mostrerà

⁴ La relazione di Petch Hall definisce una relazione inversa tra la tensione di snervamento $\Delta\tau$ e le dimensioni del grano.

$$\Delta\tau \propto \frac{k}{d^x}$$

dove k è il coefficiente di incrudimento, che come x è specifico del materiale. Più piccole sono le dimensioni medie dei grani, più piccola è la tensione repulsiva subita da una dislocazione a bordo grano e più alta è la tensione applicata necessaria per il propagarsi della dislocazione attraverso il materiale.

quindi migliori *performance* meccaniche lungo la direzione longitudinale, rispetto a quella trasversale. Tale fenomeno è più marcato nella laminazione a freddo.

1.3.1 Arco di contatto e influenza del raggio dei cilindri

Il carico di laminazione generato dalla macchina, viene trasferito al laminato attraverso la pressione esercitata sull'area di contatto tra laminato e cilindro di lavoro. Tale area è data dal prodotto della larghezza del laminato w per la lunghezza dell'arco di contatto AB . Al variare quindi di quest'ultimo varia la pressione applicata al laminato.

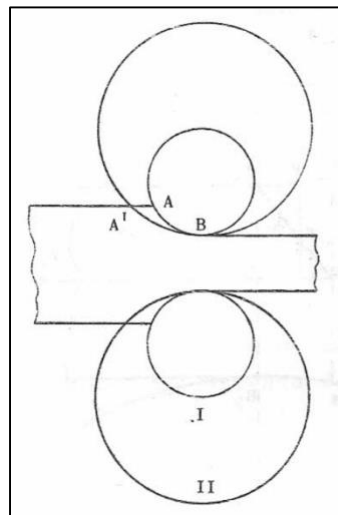


Figura 1.13 – Variazione dell'arco di contatto al variare del raggio dei cilindri

A sua volta l'arco di contatto è legato alla differenza di spessore tra ingresso e uscita dalla gabbia e dal diametro dei cilindri di lavoro.

Fissata una determinata riduzione di spessore, all'aumentare del raggio dei cilindri di lavoro, l'arco di contatto e di conseguenza anche l'area, aumenta, cosicché è necessario un maggior carico di laminazione per mantenere la pressione occorrente a deformare il metallo.

Di contro ciò impone un limite alla riduzione di spessore effettuabile ad ogni passo, in funzione della resistenza alla deformazione del materiale da laminare.

I laminatoi hanno un limite di forza massima che sono in grado di esercitare, quindi per laminare materiali con un'alta tensione di snervamento è necessario ridurre l'area di contatto, diminuendo la riduzione di spessore.

Questo fattore influenza la produttività degli impianti, poiché è necessario suddividere la riduzione totale in un numero maggiore di passi, con un conseguente aumento del tempo necessario al processo. Tale problema è particolarmente sentito per la laminazione a caldo, dove si effettuano le riduzioni di spessore maggiori.

Il raggio dei cilindri di lavoro influenza anche un altro parametro, ossia l'allargamento del laminato in uscita dalla gabbia. A parità di riduzione di altezza, nel passaggio tra i cilindri si avrà un allargamento maggiore se questi sono di raggio più grande. Ciò è dovuto all'azione delle forze di attrito tra laminato e cilindro che portano il materiale a fluire lungo la direzione trasversale, dove trova una minore resistenza, con un conseguente maggior allargamento. Al contrario con cilindri più piccoli, la minore superficie di contatto fa sì che sia impedito in misura minore il flusso del materiale nel senso della laminazione, con conseguente minor allargamento.

In riferimento ai cilindri I e II di Figura 1.13, è riportato il diverso allargamento del laminato.

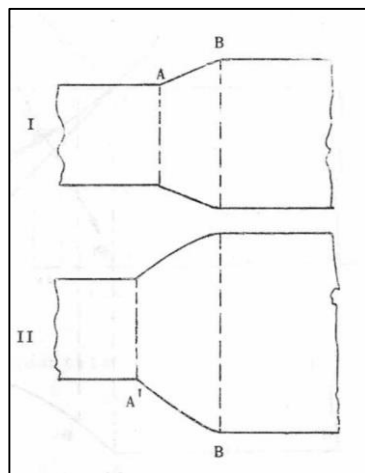


Figura 1.14 – Allargamento del laminato in funzione del diverso raggio dei cilindri

1.3.2 Sezione neutra

Si osservi come la velocità del laminato in ingresso nella gabbia di laminazione V_0 sia sempre minore della omologa in uscita V_f .

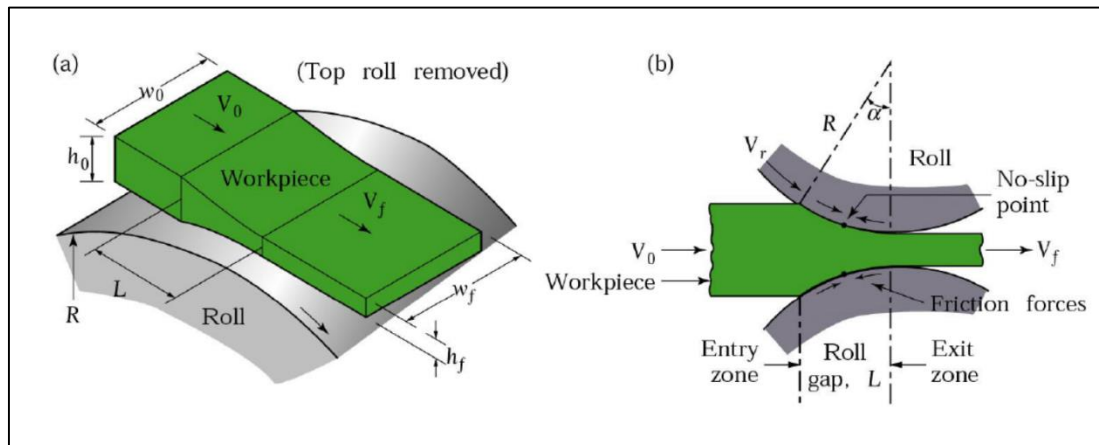


Figura 1.15 – Velocità V_0 di ingresso e V_f di uscita

Tale risultato è la diretta conseguenza della legge di conservazione del volume. Essendo la sezione di uscita minore di quella di ingresso, a causa alla riduzione di altezza, necessariamente la velocità del materiale in uscita dalla gabbia deve essere superiore affinché sia verificato l'equilibrio delle portate nelle sezioni di ingresso ed uscita.

$$V_0 \cdot S_0 = V_f \cdot S_f$$

Ne consegue che la velocità V_i del materiale della generica sezione, sarà compresa tra le velocità V_0 e V_f .

$$V_0 < V_i < V_f$$

La velocità periferica del cilindro ha invece in ogni suo punto lo stesso valore, pari a:

$$V_r = \omega \cdot r$$

Dove ω è la velocità angolare dei cilindri, e r il raggio.

Esisterà quindi una sezione in cui la velocità del materiale e del cilindro coincidono. In tale sezione, detta *Sezione neutra*, non c'è slittamento tra cilindri e materiale.

Quanto detto vale in linea teorica, nelle condizioni reali di laminazione, infatti, la zona di aderenza tra cilindro e laminato è più ampia, a causa della deformazione del materiale. Nella Figura 1.16 è possibile osservare l'andamento ideale (1) e reale (2) della velocità del materiale tra le sezioni di ingresso ed uscita.

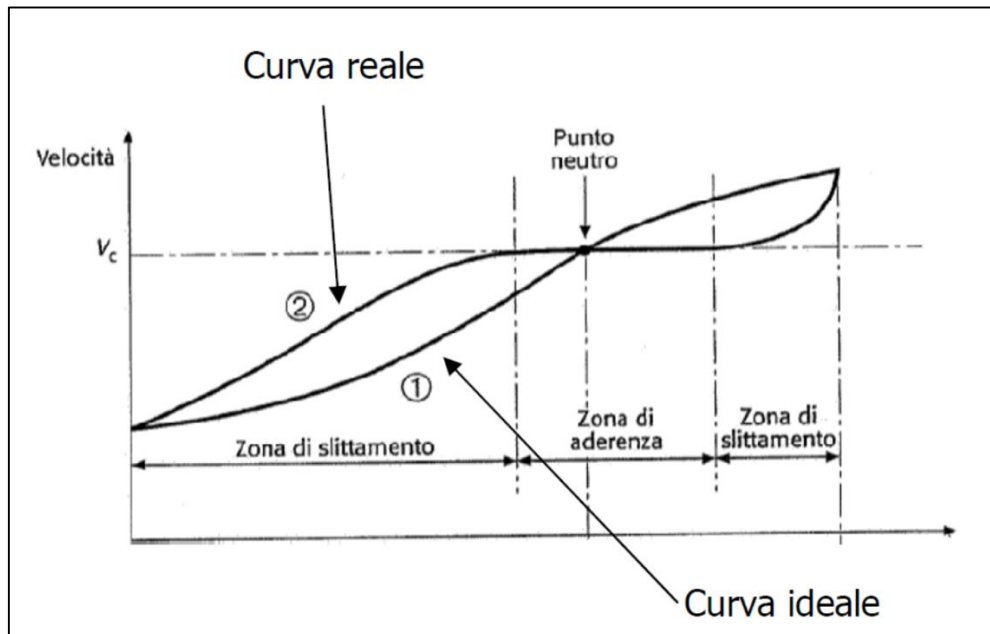


Figura 1.16 – Curve di velocità Ideale (1) e Reale (2) del materiale

La sezione neutra è anche detta *sezione di inversione*, poiché in tale punto le forze di attrito cambiano verso. Come si nota dalla Figura 1.16, a sinistra della sezione neutra la velocità del laminato è minore di quella del cilindro, le forze di attrito quindi sono dirette lungo la direzione di laminazione e tendono a “tirare” il materiale tra i due cilindri. Al contrario a destra la velocità del laminato è maggiore con le forze di attrito che tendono a frenare il flusso del materiale.

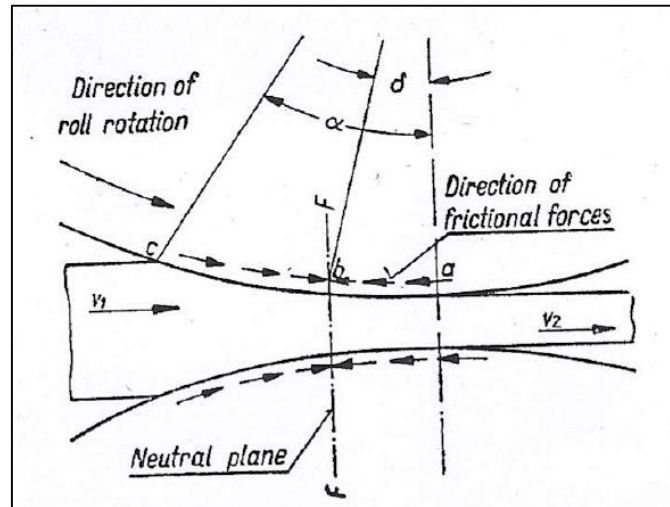


Figura 1.17 – Forze di attrito

1.3.3 Condizione di imbocco e trascinamento

Quando il lingotto è in ingresso alla gabbia di laminazione, si possono verificare due situazioni:

- I. Il metallo slitta sulla superficie dei cilindri.
- II. Il metallo è aggrappato dai cilindri e trascinato nella luce tra di essi.

I fattori che incidono su come si comporterà il materiale in lavorazione sono: il valore dell'angolo sotteso all'arco di contatto e il rapporto di tale angolo con quello di attrito. Considerando un punto dell'arco di contatto (vedi Figura 1.18), individuato dall'angolo α_0 , la forza esercitata dal cilindro può essere scomposta in due componenti, una normale F_N ed una tangenziale alla circonferenza F_T , quest'ultima data dal prodotto della prima per il coefficiente di attrito μ . A loro volta tali forze possono essere scomposte in due componenti orizzontali e verticali F_{No} , F_{Nv} e F_{To} , F_{Tv} .

La componente orizzontale F_{No} tende ad allontanare il laminato dai cilindri, al contrario la componente F_{To} tende a spingerlo nel *gap*. Le due forze verticali, F_{Nv} e F_{Tv} comprimono il metallo e sono quindi ininfluenti al fine dell'imbocco.

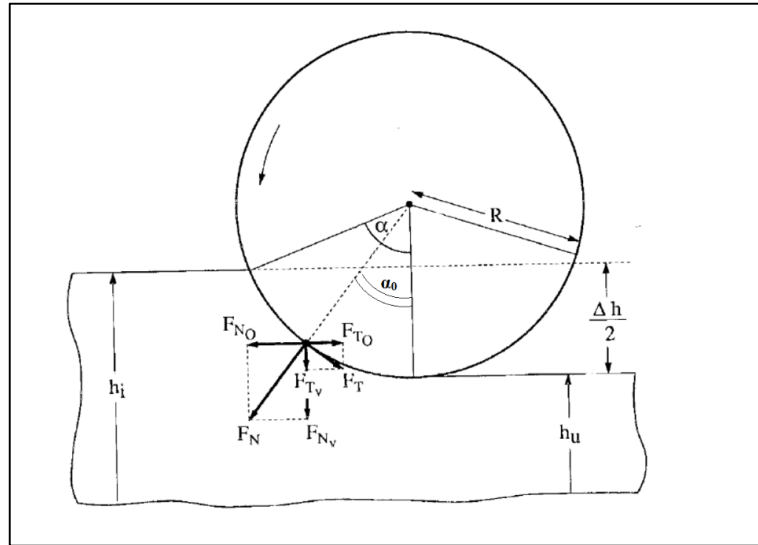


Figura 1.18 – Condizione di imbocco

È quindi chiaro che affinché il laminato sia spinto tra i cilindri, la componente orizzontale della forza tangenziale deve essere maggiore dell'omologa componente della forza normale.

$$F_{T0} > F_{N0}$$

Supponendo che tale relazione sia verificata e sapendo che:

$$F_{T0} = F_T \cdot \cos \alpha_0$$

$$F_{N0} = -F_N \cdot \sin \alpha_0$$

$$F_T = \mu \cdot F_N$$

Per l'equilibrio orizzontale si ha:

$$F_{T0} + F_{N0} = 0$$

Sostituendo si ottiene:

$$\mu \cdot F_N \cdot \cos \alpha_0 = F_N \cdot \sin \alpha_0$$

$$\mu = \frac{\sin \alpha_0}{\cos \alpha_0} = \tan \alpha_0$$

L'equilibrio delle forze orizzontali lo si ha quando il coefficiente di attrito eguaglia il massimo angolo di imbocco

$$\mu = \tan \alpha_{\max} = \tan \rho$$

Quindi l'angolo massimo di imbocco è pari all'angolo di attrito tra cilindro e laminato, ne consegue:

- $\alpha \leq \rho$ \rightarrow Imbocco Spontaneo

Il lingotto viene afferrato e trascinato tra i cilindri autonomamente.

- $\rho < \alpha \leq 2\rho$ \rightarrow Imbocco semi-forzato

È necessario applicare una forza iniziale affinché il lingotto sia trascinato dai cilindri.

- $\alpha = 2\rho$ \rightarrow Imbocco forzato

È necessaria l'applicazione di una forza affinché possa avvenire il processo di laminazione.

1.4 Difetti di laminazione

Durante il processo di riduzione in nastri, si possono presentare una serie di difetti, che possono essere categorizzati in:

- Difetti di superficie
- Difetti di forma

I primi possono derivare da inclusioni nel materiale come scaglie d'ossido, sporco, oppure da cause derivanti dai processi di pre-laminazione che impediscono il raggiungimento di un ottimale finitura superficiale. Altre difetti superficiali sono dovuti al processo di laminazione stesso, nel caso ad esempio di solchi sul laminato, dovuti ad un'eccessiva usura dei cilindri di lavoro.

I difetti di forma invece distorcono o compromettono l'integrità di un laminato e sono dovuti a parametri di processo non corretti.

Alcuni esempi di difetti di forma sono:

- Ondulazioni dei bordi

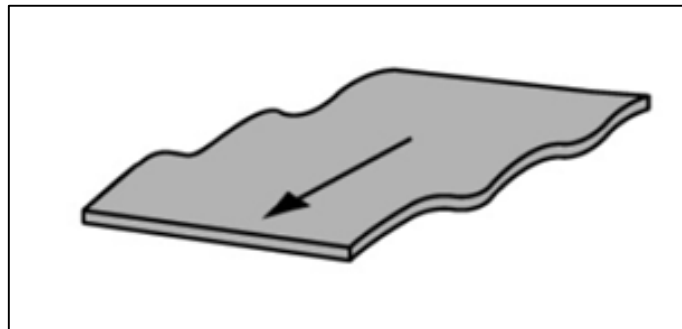


Figura 1.19 – Difetto di forma: Ondulazione dei bordi

Questi difetti sono dovuti ad una sovrallaminazione dei bordi del nastro, con conseguente maggiore allungamento delle sezioni laterali, che non potendo distendersi si ingobbano. Tale difetto è molto spesso dovuto a cilindri fuori livellamento o ad un'eccessivo rigonfiamento termico laterale a causa di un errato controllo del raffreddamento.

- Cerniere a centro nastro

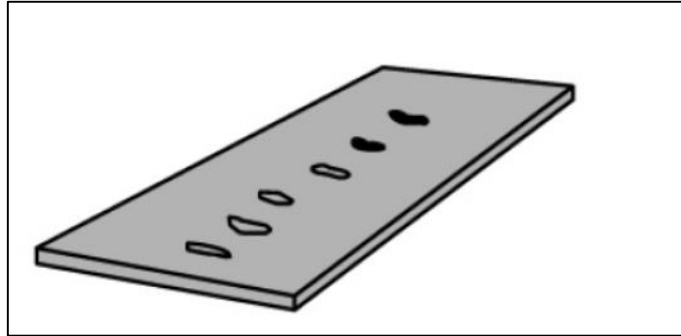


Figura 1.20 – Difetto di forma Cerniere a centro nastro

È in fenomeno esattamente inverso a quello precedente. In questo caso la sovrallaminazione avviene nella zona centrale del nastro, l'eccessiva laminazione si manifesta sotto forma di ondulazioni centrali. Tale difetto è dovuta ad un eccessivo rigonfiamento centrale del cilindro dovuto ad un errato o mancato raffreddamento.

- Delaminazione (alligatoring).

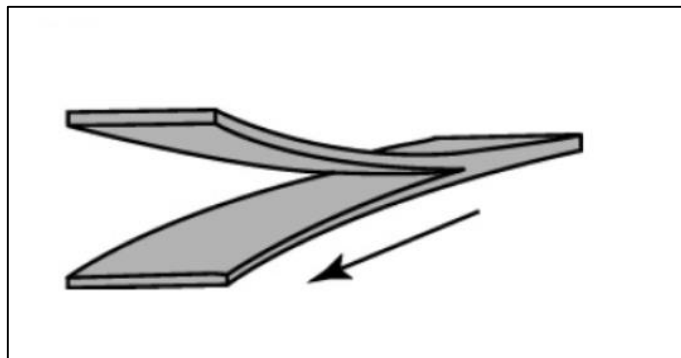


Figura 1.21 – Difetto di forma: coda di alligatore

Vi è la formazione di una frattura in corrispondenza del piano di simmetria orizzontale del laminato, frattura che determina l'apertura e la progressiva separazione delle due parti del laminato in uscita dalla gabbia di laminazione per effetto dell'attrito con il cilindro di lavoro superiore ed inferiore,

generando la tipica forma *a bocca di alligatore*. Le cause vanno ricercate nella non omogenea deformazione del metallo lungo lo spessore ed al conseguente stato tensionale residuo presente nel materiale. L'effetto sarà tanto maggiore quanto maggiore lo spessore del laminato, minore il diametro dei rulli e contenuta l'entità di deformazione impressa.

Tali zone dette “code”, vengono tranciate nella fase precedente agli ultimi passi di laminazione, per permettere un corretto avvolgimento del nastro sull’aspo.

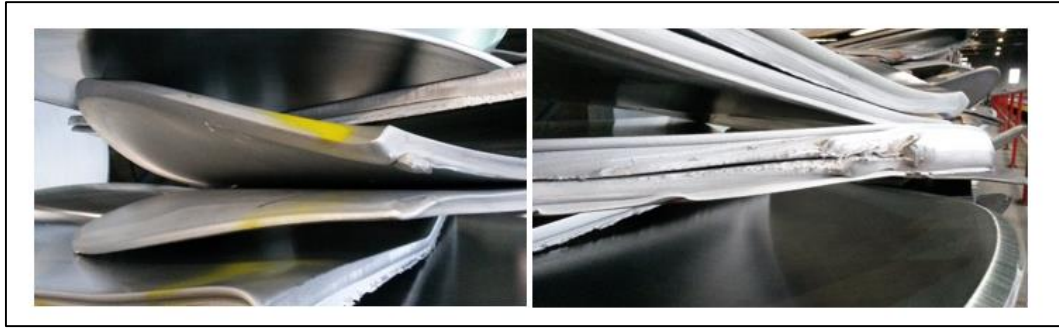


Figura 1.22 – Difetto di forma: Alligatoring (coda di alligatore)

1.5 Profilo di spessore del laminato: Crown

La distribuzione dello spessore di un laminato, al termine del processo di laminazione a caldo, è un fattore fondamentale che può condizionare in maniera marcata la qualità e la finitura superficiale del laminato durante le successive fasi di laminazione a freddo. In particolare una eccessiva disuniformità dello spessore, provoca l'insorgere di tensioni interne e ingobbimenti della superficie del laminato, che pregiudicano l'utilizzo del prodotto nelle successive fasi della filiera produttiva.

La condizione ideale è quella di un laminato con sezioni costanti e perfettamente rettangolari lungo tutta la sua lunghezza. Nella realtà produttiva, quando una placca, prodotto di fonderia, viene lavorata attraverso laminazione a caldo, lo spessore lungo la larghezza del laminato in uscita non è distribuito uniformemente. La quantificazione di tale deviazione rispetto allo spessore nominale imposto al laminato, viene effettuata mediante il parametro del *Crown*.

Tale parametro è definito come la differenza tra lo spessore al centro del laminato e la media dello spessore a bordi, il tutto rapportato allo spessore lungo la *center line*⁵.

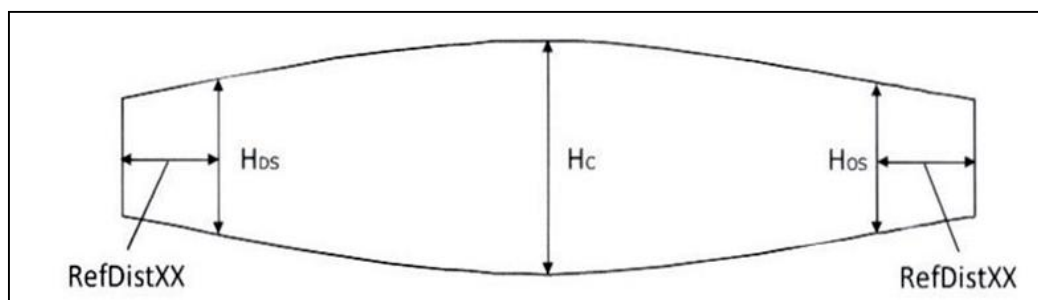


Figura 1.23 – Crown: Valutazione del profilo di spessore

Dalla Figura 1.23 si nota come lo spessore sia maggiore al centro rispetto ai bordi, tale andamento del profilo è in parte ricercato, per avere un margine di intervento durante le successive fasi di laminazione a freddo.

⁵ Linea immaginaria che corre lungo tutto la placca di laminazione in posizione centrale

$$Cr = \frac{H_C - \left(\frac{H_{DS} + H_{OS}}{2}\right)}{H_C}$$

- H_c È lo spessore al centro;
- H_{Ds} e H_{Os} Spessore ai bordi;
- $RefDist_{XX}$ Indica la distanza di riferimento dal bordo
nastro, rispetto alla quale è misurato lo
spessore ai bordi

All'uscita dalla gabbia è presente un sistema di bracci robotizzati dotati di due teste di misurazione a raggi X. La sorgente dei raggi è contenuta all'interno di una scatola schermata denominata "shutter". Durante la fase di misura le due teste robotizzate si spostano sul laminato e la sorgente di emissione è aperta. Una parte della radiazione incidente viene assorbita dal laminato e il ricevitore, montato dall'altro lato del nastro, rileva l'attenuazione del flusso radioattivo generando un impulso elettrico proporzionale all'intensità della radiazione percepita. Quest'ultima dipende dallo spessore e dalla lega del laminato. Quando la misura si interrompe viene azionato nuovamente lo *shutter*, che provvede a chiudere l'apertura dalla quale le radiazioni sono state emesse.

Una prima testa è posizionata in corrispondenza della center line, e fornisce il valore di spessore H_c lungo tutta la lunghezza del laminato, la seconda invece è mobile, ed effettua una scansione dello spessore lungo la larghezza. Attraverso la combinazione dei dati di questi due misuratori, il sistema di telerilevamento è in grado di fornire un

valore puntuale del Crown. Per motivi tecnologici vengono escluse dalla misurazione i valori in prossimità del bordo. Nelle zone più esterne il sistema potrebbe non individuare il maniera esatta il bordo del laminato e di conseguenza generare degli errori di misura tali da falsare la misurazione, da qui la necessità di definire il parametro *RefDistXX* nella formula, che delimita gli estremi del campo di valori dello spessore utilizzati per il calcolo del Crown, rispetto alla larghezza reale della piastra.

1.5.1 *Fenomeni di influenza del Crown*

Il profilo di spessore del laminato è influenzato principalmente da 4 fattori che sono:

- I. *Flessione cilindri*
- II. *Bombatura di rettifica (camber)*
- III. *Bombatura termica*
- IV. *Bombatura idraulica (roll bending)*

I. *Flessione cilindri*

Quando il materiale entra a contatto con i rulli, il carico di laminazione applicato ai supporti dei cilindri, viene trasmesso al laminato lungo l'area di contatto. Tale pressione distribuita lungo i cilindri ne causa una certa flessione con una conseguente variazione del gap lungo la direzione trasversale del laminato. Di fatto la luce tra i rulli di lavoro assume una forma detta a "barilotto". Come risultato della flessione, il pezzo tende ad essere più spesso nella zona centrale rispetto alle estremità.

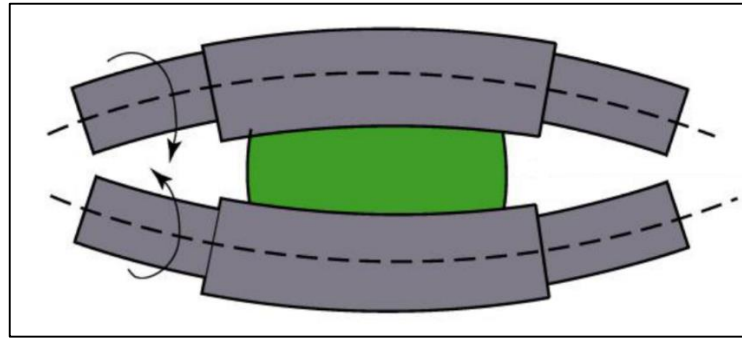


Figura 1.24 – Flessione Cilindri

Maggiore è il carico di laminazione, maggiore sarà l'inflessione subita dai cilindri di lavoro. Applicando quindi un carico minore si potrebbe limitare questo fenomeno. Purtroppo il carico di laminazione non è una variabile indipendente, ma è un parametro imposto dal processo, nello specifico dalla resistenza alla deformazione (*Yield*) della lega in lavorazione e dalla riduzione di spessore del passo. Un'altra possibilità per ridurre l'inflessione consiste nell'irrigidire i rulli aumentandone il diametro, ma anche questa strada non è facilmente percorribile. Aumentare il diametro infatti, implica un aumento della superficie di contatto tra cilindri e laminato, il che si traduce, a parità di pressione necessaria alla laminazione, in un aumento del carico applicato ai cilindri, il quale genererebbe a sua volta un ulteriore aumento della flessione.

La soluzione utilizzata per controllare questo fenomeno è quella di sdoppiare le mansioni affidate ai cilindri raddoppiandone il numero, ed utilizzare appunto un laminatoi di tipo *Quarto*.

II. Bombatura di rettifica (*camber*)

Altro parametro di influenza del *Crown* è la *bombatura di rettifica*. Essa è utilizzata per compensare la variazione del profilo di spessore dovuto alla flessione dei cilindri, oppure quando si vuole conferire una certa bombatura al laminato.

I cilindri di laminazione, infatti, non hanno una superficie perfettamente cilindrica ma spesso viene conferito un determinato profilo di forma concava o convessa a seconda

di quelle che sono le esigenze tecnologiche del processo. Tale variazione rispetto alla superficie cilindrica nominale è definita bombatura. Essa può essere:

- ❖ Positiva, se la superficie di lavoro del cilindro assume una forma convessa
- ❖ Negativa, se la superficie di lavoro del cilindro assume una forma concava

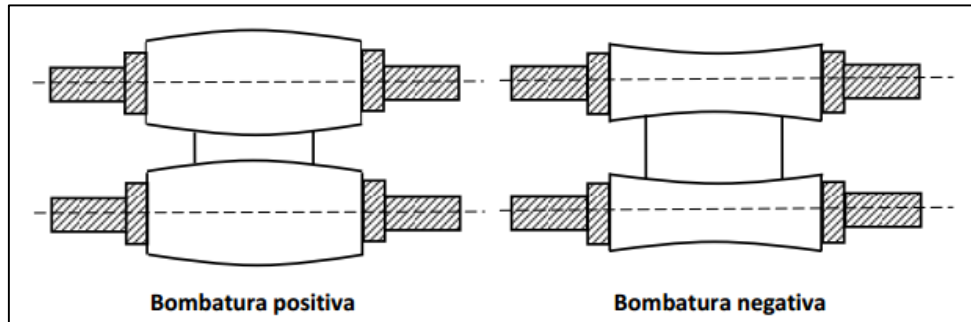


Figura 1.25 – Tipologie di bombatura

Tale profilo viene conferito mediante un'operazione di rettifica alla mola. Pertanto è un parametro fisso sul quale non si può intervenire durante la lavorazione se non con la sostituzione dei cilindri.

Presso la Laminazione sottile S.p.A. si utilizzano, allo sbozzatore, dei cilindri di lavoro con una bombatura negativa di -0.03 mm, ossia 3 centesimi di millimetro, per produrre un laminato leggermente spanciato al centro.

Il maggiore spessore della zona centrale viene recuperato nei laminatoi a valle dove invece si opera con un crown positivo, ottenendo all'uscita un prodotto finito piano.

Di seguito una tabella riassuntiva dei valori di *camber* utilizzati presso i laminatoi della Laminazione Sottile S.p.A.

Laminatoio	Bombatura cilindri di lavoro	Bombatura cilindri di supporto
<i>Sbozzatore</i>	-0.03 mm	0 mm
<i>Intermedio 1</i>	+0.05 mm	0 mm
<i>Intermedio 2</i>	0.0 mm	0 mm
<i>Foil mino</i>	0.0 mm	0 mm
<i>Achembach 1 e 2</i>	+0.05 - +0.08*	+0.03 mm
<i>(*) il valore cambia a seconda della tipologia di prodotto finito</i>		

Tabella 1.3 – Valori di camber dei cilindri presso Laminazione Sottile S.p.A.

III. Bombatura Termica

Un altro fattore che influenza il processo di laminazione e la distribuzione dello spessore del laminato, è il calore dissipato dalle placche in lavorazione.

Le placche entrano nella gabbia di laminazione con una temperatura superiore ai 480°C. Di questo calore, una piccola parte viene disperso nell'aria circostante, mentre una grossa aliquota viene trasferita ai cilindri di lavoro. Quest'ultimi che hanno una temperatura più bassa, sono soggetti ad un ΔT che ne causa una espansione termica. Non tutto il cilindro è però soggetto alla stessa variazione di temperatura.

La porzione di superficie del cilindro a contatto con la placca, infatti, dipende dalla larghezza stessa del laminato al passo considerato. Ciò causa un gradiente termico sul cilindro e una conseguente non uniformità della dilatazione. Tale fenomeno può essere accentuato o mitigato mediante l'attivazione degli ugelli di raffreddamento posti sui cilindri, in questo modo la dilatazione termica dei cilindri viene sfruttata per conferire una certa bombatura al laminato.

È noto che l'espansione termica di un materiale omogeneo, quale ad esempio l'acciaio dei cilindri di lavoro, è direttamente proporzionale al ΔT applicato. Se per ipotesi questa differenza di temperatura fosse uniformemente distribuita su tutta l'arco di contatto allora il cilindro subirebbe una deformazione omogenea in ogni suo punto.

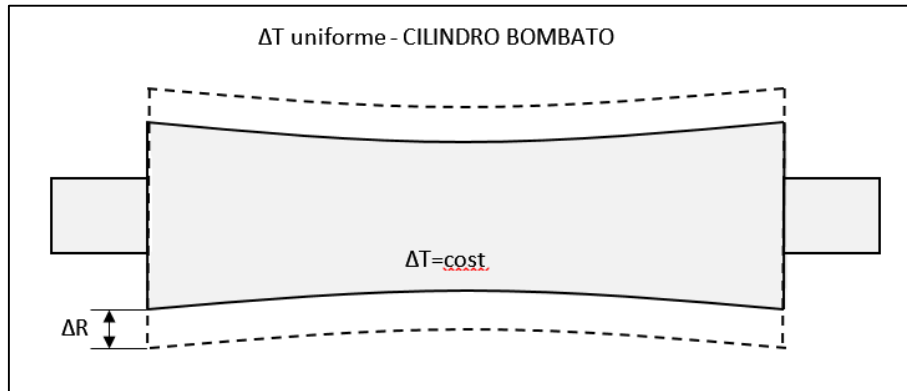


Figura 1.26 – Schema dilatazione termica cilindro bombato

Trascurando la dilatazione in senso assiale del cilindro, che non è di interesse per le considerazioni in oggetto, il rullo di lavoro subisce una dilatazione ΔR costante lungo tutta la sua larghezza (vedi Figura 1.26).

La situazione cambia se si considera il caso reale di variazione di temperatura non uniforme. Nella realtà aziendale, infatti, il raffreddamento non è mai eseguito in maniera omogenea su tutto il cilindro, ma è focalizzato con una maggiore portata di fluido nelle zone direttamente a contatto con il laminato, mentre le zone alle estremità sono soggette ad un flusso minore di liquido.

Ne consegue una diversa distribuzione della variazione termica lungo la tavola utile del cilindro di lavoro. Nello specifico si avrà un ΔT minore nella zona centrale, investita da una maggiore quantità di fluido. Mentre le zone in corrispondenza della periferia del laminato avranno una ΔT maggiore. La temperatura va poi diminuendo verso gli estremi del cilindro, dove non è presente la refrigerazione con emulsione, ma non vi è nemmeno il contatto diretto con la placca e di conseguenza solo una ridotta aliquota di calore investe queste zone. Il gradiente termico provoca quindi una diversa dilatazione delle zone del cilindro.

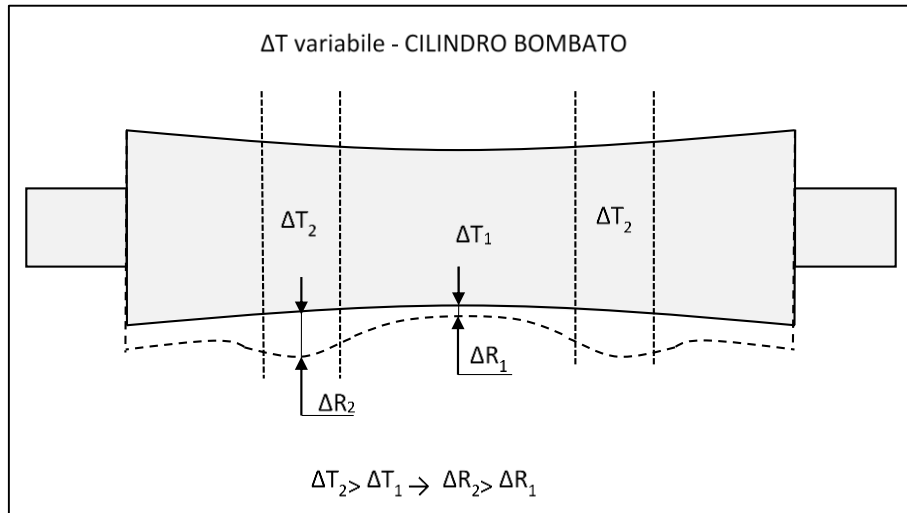


Figura 1.27 – Schema semplificato del fenomeno di dilatazione non uniforme dei cilindri

In particolare la zona centrale subirà una dilatazione minore rispetto alle zone periferiche, determinando il profilo tratteggiato in Figura 1.27.

Questo ΔR aggiuntivo conferito ai cilindri è detto *Bombatura termica*, con il quale si va a variare la bombatura di rettifica propria dei cilindri di lavoro

L'operatore variando la quantità e le zone investite dall'emulsione interviene su tale parametro modificando in corso d'opera il profilo di spessore. Tuttavia l'uso del raffreddamento differenziato per modificare il crown è piuttosto limitato, a causa della divisione in zone troppo ampie presente sull'impianto sbozzatore e dalla difficoltà di controllo di tale fenomeno. Per effettuare un controllo più preciso della bombatura termica servirebbe un maggiore numero di ugelli, posti ad una distanza minore l'uno dall'altro, come avviene nei laminatoi a freddo, dove sono posti a circa 20mm l'uno dall'altro a fronte dei 100mm e 200mm nelle zone più esterne dello sbozzatore. Tale distanza tra un ugello e un altro fa sì che non sia possibile un controllo dettagliato delle zone da raffreddare e quindi il profilo di bombatura termico che si conferisce risulta essere approssimativo.

IV. Bombatura Idraulica

Per definire quindi il profilo di spessore del laminato si preferisce agire principalmente con la *bombatura idraulica* negli ultimi passi.

Nei laminatoi di tipo Quarto, infatti, vi è la possibilità di agire sulla bombatura anche attraverso la flessione dei cilindri di lavoro (roll bending). Analogamente alla bombatura di rettifica essa può essere:

- *Positivo*, se il suo effetto simula una bombatura positiva dei cilindri di lavoro;
- *Negativo*, se il suo effetto simula una bombatura negativa dei cilindri di lavoro

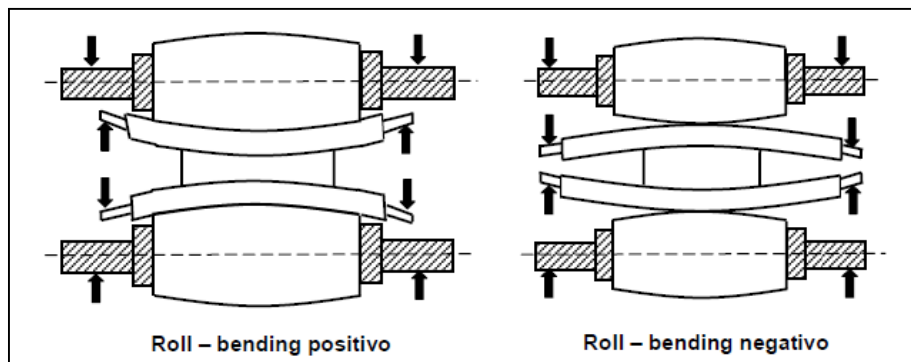


Figura 1.28 – Roll bending

Tale flessione è conferita ai cilindri mediante l'azione di martinetti idraulici. Nello specifico sono presenti due sistemi idraulici con relativi pistoni.

Un sistema conferisce il bending positivo ai cilindri, agendo sui martinetti posti tra le guarniture dei cilindri di lavoro. Aumentando la pressione di alimentazione del sistema, i pistoni allontanano tra loro gli estremi dei cilindri flettendoli.

Un secondo sistema idraulico invece alimenta i pistoni posti, per il cilindro di lavoro superiore, nel corpo delle guarniture con reazione contro le guarniture del cilindro di sostegno superiore; per il cilindro di lavoro inferiore, nel corpo delle guarniture di sostegno inferiori, con reazione contro le guarniture del cilindro di lavoro.

L'azione di tali martinetti conferisce al cilindro una bombatura negativa.

CAPITOLO 2

ANALISI STATISTICA

2.1 Introduzione

L'attività di D svolta presso la *Laminazione sottile s.p.a.*, ha avuto come oggetto la raccolta dati e lo studio dei parametri di processo del laminatoio sbizzatore col fine di individuare i parametri che maggiormente influenzano la deviazione del profilo di spessore (*Crown*) rispetto al valore di target, per ciascuna scheda di laminazione.

L'attività è costituita da 2 fasi principali:

- I. Acquisizione dei dati
- II. Processamento

La prima fase di acquisizione dei dati di lavorazione è stata resa possibile grazie al sistema di monitoraggio del laminatoio, l'*IBA analyzer*.

Tale software si interfaccia tramite opportuni moduli al sistema di regolazione Achembach e acquisisce in tempo reale tutti i dati inviati rilevati dai sensori della macchina. Esso inoltre consente di rappresentare mediante opportuni grafici l'andamento dei vari parametri e di effettuare un'analisi dinamica delle grandezze.

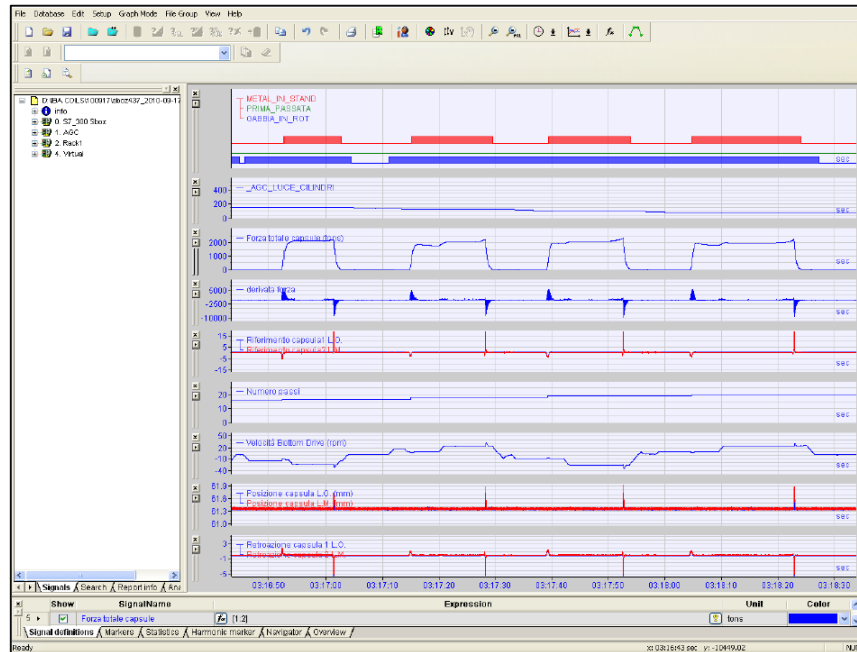


Figura 2.1 – Schermata del software IBA analyzer

I dati acquisiti dal sistema vengono immagazzinati in un database interno all'azienda e conservati per un certo periodo di tempo, al termine del quale il sistema in automatico cancella i dati più vecchi per fare spazio ai nuovi. Tramite il terminale posto nella cabina di comando dello sbozzatore, è possibile interrogare il sistema con una *query* ed ottenere tutte le informazioni di determinate lavorazioni di interesse.

I dati sono estratti in un file di testo in formato .csv, in cui sono tabellati in righe e colonne separate da virgole. Per maggiore praticità il file generato dal sistema è importato in *MS Excel* per premettere una più chiara visualizzazione e procesamiento dei dati.

Coil Data	from mill Sels Hot: 01/01/2013 06:30 - 31/12/2013 22:30														
No.	Operator	Plan No.	Slab ID.	Start Date	End Date	Start Time	End Time	Coil ID	Strip width	Alloy	Thermal	Entry thicl	Exit thicl	Coil Temp	Temperat
1	Acampore	433	2013-0052	2013.06.11	2013.06.11	21:23	21:37	2013-06-0	1320	8006M	07	7,50	2,70	317	568
2	Acampore	433	2013-0052	2013.06.11	2013.06.11	21:39	21:54	2013-06-0	1320	8006M	07	7,50	2,70	323	570
3	Acampore	433	2013-0052	2013.06.11	2013.06.11	21:56	22:16	2013-06-0	1320	8006M	07	7,50	2,70	312	573
4	Acampore	433	2013-0052	2013.06.11	2013.06.11	22:20	22:36	2013-06-0	1280	8006M	07	7,50	2,70	326	575
5	Acampore	433	2013-0035	2013.06.11	2013.06.11	22:51	23:05	2013-06-0	1140	8006M	07	7,50	2,70	336	568
6	Acampore	433	2013-0035	2013.06.11	2013.06.11	23:07	23:25	2013-06-0	1140	8006M	07	7,50	2,70	341	569
7	Acampore	433	2013-0052	2013.06.11	2013.06.14	23:44	01:06	2013-06-0	1070	8006M	07	7,50	2,70	330	567
8	Acampore	433	2013-0052	2013.06.14	2013.06.14	00:52	01:06	2013-06-0	1070	8006M	07	7,50	2,70	330	570
9	Acampore	433	2013-0052	2013.06.14	2013.06.14	01:28	01:43	2013-06-0	1070	8006M	07	7,50	2,70	335	573
10	Acampore	433	2013-0052	2013.06.14	2013.06.14	01:45	01:59	2013-06-0	1070	8006M	07	7,50	2,70	326	571
11	Acampore	434	2013-0036	2013.06.14	2013.06.14	02:02	02:16	2013-06-0	1010	3005C	01	7,00	3,00	348	569
12	Acampore	434	2013-0036	2013.06.14	2013.06.14	02:22	02:35	2013-06-0	1170	3005C	01	8,00	4,00	360	562
13	Acampore	434	2013-0037	2013.06.14	2013.06.14	02:38	02:52	2013-06-0	1200	3005C	01	7,00	3,00	343	556
14	Acampore	434	2013-0036	2013.06.14	2013.06.14	02:53	03:08	2013-06-0	1200	3005C	01	7,00	3,00	357	550
15	Acampore	434	2013-0036	2013.06.14	2013.06.14	03:10	03:24	2013-06-0	1230	3005C	01	7,00	3,00	352	545
16	Acampore	434	2013-0036	2013.06.14	2013.06.14	03:25	03:40	2013-06-0	1240	3005C	01	7,00	3,00	353	539
17	Acampore	434	2013-0036	2013.06.14	2013.06.14	03:57	04:12	2013-06-0	1260	3005C	01	7,00	3,00	328	532
18	Acampore	434	2013-0036	2013.06.14	2013.06.14	05:39	05:53	2013-06-0	1300	3005C	01	7,00	3,00	354	567
19	Acampore	434	2013-0037	2013.06.14	2013.06.14	05:54	06:11	2013-06-0	1300	3005C	01	7,00	3,00	340	561

Figura 2.2 – Esempio di file .csv esportato dal sistema IBA

I dati di lavorazione così estratti dal sistema sono stati opportunamente processati per costruire delle *carte di controllo*, con le quali si va a monitorare l'andamento del processo di laminazione caldo.

Con la procedura suddetta è stata scattata un "istantanea" della situazione della produzione allo sbozzatore, in modo tale da avere un quadro generale al fine di individuare le criticità del processo.

Successivamente è stata effettuata una analisi di correlazione, in cui si è cercato di ricavare l'influenza dei vari parametri di processo sul Crown.

Le modalità di costruzione delle carte di controllo e di esecuzione della analisi di correlazioni sono illustrate con maggiore dettaglio nei paragrafi seguenti.

2.2 Panoramica della produzione

L'impianto sbozzatore della Laminazione sottile S.p.A., serve i 4 impianti di finitura presenti nello stabilimento ed è per tale motivo, un *asset* fondamentale per la produttività dell'azienda con la sua capacità produttiva di circa 1100 nastri sbozzati al mese. All'epoca dell'inizio dell'attività di raccolta dati, non essendo disponibili dati completi per il 2015 si è deciso di volgere lo sguardo sulla produzione 2014.

Dal database del sistema *Achembach* risulta, per tale anno, una produzione totale di 13275 nastri di alluminio, di cui 13 con denominazione di lega mancante e pertanto esclusi dal conteggio. I restanti coil sono distribuiti tra le seguenti famiglie di leghe:

FAMIGLIA	N° nastri
Serie 1000	979
Serie 3000	2501
Serie 4000	343
Serie 5000	1304
Serie 8000	8135
Totale complessivo	13262

Tabella 2.1 – Produzione 2014

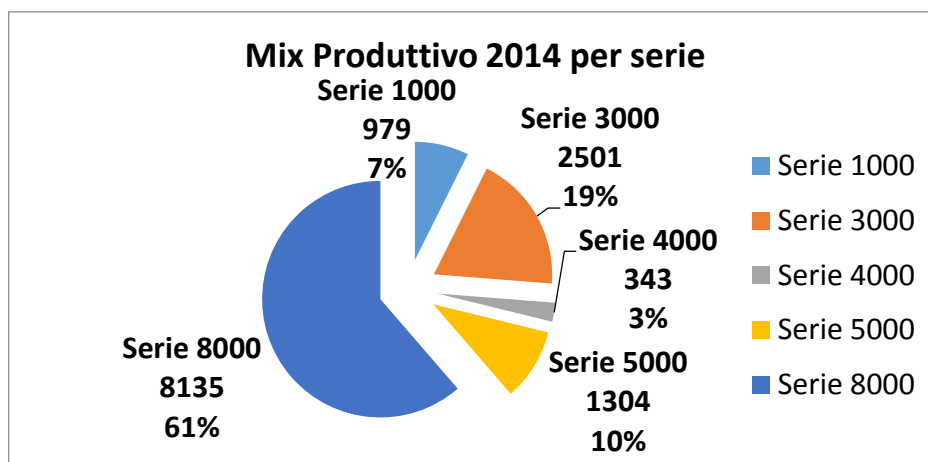


Grafico 2.1 – Mix produttivo

Come si nota dal grafico, il grosso della produzione è concentrato sulla Serie 8000 e Serie 3000, che da sole coprono l'80% della produzione totale. Scendendo più in dettaglio e discriminando per lega, si può notare come la più lavorata sia la lega 8009.

SERIE	Lega	N° Nastri	
1000	1050	238	1,79%
	1200	552	4,16%
	1230	189	1,43%
3000	3003	180	1,36%
	3004	6	0,05%
	3005	916	6,91%
	3105	1399	10,55%
4000	4005	3	0,02%
	4006	340	2,56%
5000	5005	26	0,20%
	5049	1	0,01%
	5052	1027	7,74%
	5083	1	0,01%
	5754	249	1,88%
8000	8006	1742	13,14%
	8009	2664	20,09%
	8011	2514	18,96%
	8079	1215	9,16%
Totale complessivo		13262	100,00%

Tabella 2.2 – Produzione 2014 per tipologia di lega

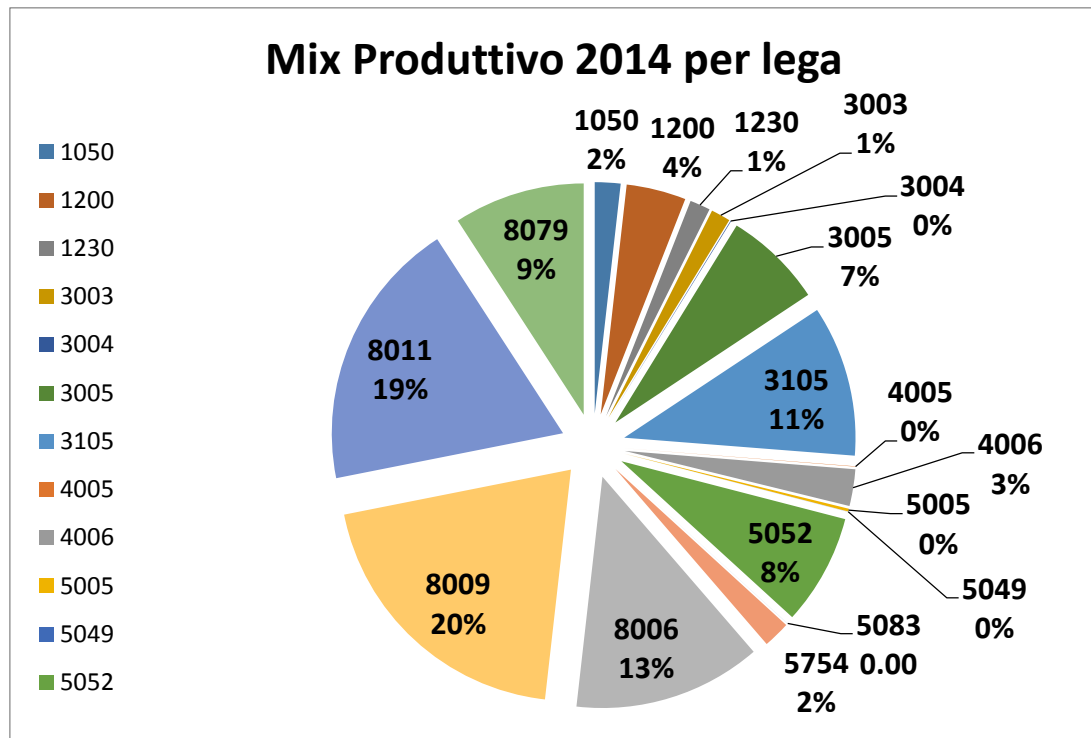


Figura 2.3 – Mix produttivo per lega

2.3 Selezione dei dati

Dal database del sistema IBA è possibile ottenere tutti i parametri di ciascuna lavorazione, in particolare in questa prima fase ci si è soffermati sui valori di *Crown[%]* (vedi par.1.5) e di *Tilt[%]*⁶. Tuttavia i valori riportati, sono soggetti ad errori di misurazione e/o di scrittura nel database interno. È quindi necessario ripulire il set di dati da valori anomali che altererebbero i risultati dell'analisi. La fase di selezione dei dati è stata coadiuvata dal supporto degli ingegneri di produzione, che avendo

⁶ Il Tilt è valutato come la media dello spessore del lato motore (DS), meno la media delle misurazioni di spessore del bordo lato operatore (OS), rapportato al valore target di spessore del passo.

$$Tilt = \frac{H_{DS} - H_{OS}}{H_{TARGET}} \%$$

maggior esperienza sull'impianto, hanno saputo consigliare la corretta estrazione dei dati dai sistemi di monitoraggio.

In particolare per discriminare quali valori estromettere dall'analisi, è stato utile ragionare oltre che sul valore di Crown, anche su quello di Tilt%.

Sono stati quindi definiti dei criteri per effettuale la selezione dei nastri da scartare.

I nastri scartati presentavano:

- Valori nulli sia di Crown che di Tilt: è indice di una mancata rilevazione/scrittura da parte del sistema informatico
- Valori di Tilt superiori a 1 e inferiori a -1: sono indice una errata misurazione e/o il rotolo è stato successivamente scartato per problemi di laminazione. Con una macchina a regime è infatti tecnologicamente impossibile ottenere tali valori di tilt.
- Valori di Crown >2 e $<-0,5$: Stesso discorso del caso precedente. Eccezion fatta per le leghe della famiglia 5000. Queste infatti sono caratterizzate da valori mediamente più alti di Crown, dovuta alla maggior resistenza della lega. Solo per la serie 5000 si alza il limite di accettabilità del Crown a 3.
- Combinazione di valore di Crown nullo e tilt al di fuori del range $[-0,5; 0,5]$: Con tali valori di tilt, ammesso che siano correttamente riportati nel database, è impossibile ottenere un Crown nullo, pur considerando l'errore del misuratore pari a circa il 3%.
- I nastri presenti nell'elenco dei rotoli scartati per guasto o anomalia impianto.

Seguendo i criteri suddetti di selezione sono stati quindi esclusi dalla popolazione:

- ✓ 275 Rotoli con valore di Crown e Tilt ($Cxx=0$ e $Tilt=0$);
- ✓ 463 Rotoli con valore di Tilt >1 e <-1
- ✓ 11 Rotoli con Crown nullo e Tilt fuori range ($Cxx=0$; Tilt $>0,5$ e $<-0,5$)
- ✓ 54 Rotoli con Crown $<-0,5$
- ✓ 3 Rotoli con Crown >2
- ✓ 3 Rotoli scartati per guasto/anomalia impianto

Per un totale di 809 rotoli scartati su una base di 13262, corrispondente al 6,11% della popolazione originaria.

La distribuzione della popolazione a valle dell'operazione di selezione dei dati, è la seguente:

SERIE	Lega	N° Nastri
1000	1050	230
	1200	535
	1230	181
3000	3003	175
	3004	6
	3005	884
	3105	1382
4000	4005	3
	4006	327
5000	5005	25
	5049	1
	5052	989
	5083	1
	5754	237
8000	8006	1499
	8009	2476
	8011	2346
	8079	1156
Totale complessivo		12453

Tabella 2.3 – Dettaglio della produzione dopo la selezione dei dati

Su tale popolazione è stata effettuata l'analisi tramite carte di controllo.

2.4 Costruzione delle carte di controllo

Perché un prodotto possa soddisfare le esigenze dei consumatori deve essere il risultato di un processo produttivo stabile e ripetibile. Per raggiungere questo scopo il processo deve essere in grado di produrre pezzi tali che la variabilità del valore nominale specifico del prodotto sia la più bassa possibile.

Nella fattispecie del processo di laminazione a caldo, si necessita che il valore di *Crown* delle bramme sbozzate, deve rientrare in un determinato intervallo di valori, compreso tra 0 ed 1.

Per monitorare l'andamento di tale parametro si utilizzano le **carte di controllo**. Questo strumento statistico consta fondamentalmente di un grafico a linee, in cui sulle ascisse sono presenti gli identificativi dei pezzi prodotti e sulle ordinate i corrispondenti valori del parametro in osservazione, il *crown*. Si tracciano successivamente delle linee, in corrispondenza dei valori di soglia, così da individuare a colpo d'occhio la rispondenza di uno determinato pezzo ai parametri di specifica.

Tuttavia affinché tale strumento sia efficace, e permetta di individuare i fenomeni di deviazione dalle specifiche, è importante scegliere un campione di osservazione omogeneo, ossia caratterizzato da stesse condizioni e/o caratteristiche di produzione. Per tale ragione sono state costruite carte di controllo specifiche per ogni tipologia di lega.

Un altro parametro che influenza il meccanismo deformativo è la larghezza della bramma, poiché varia l'aera di contatto con il cilindro e la capacità di imprimere la voluta bombatura da parte della macchina.

In linea di principio infatti, si può dire che all'aumentare della larghezza, e dello spessore, della placca, la gabbia di laminazione riesce più facilmente ad imprimere il voluto profilo di *crown*. Per tale motivo è stato scelto di costruire le carte, discriminando i nastri laminati per spessore e per larghezza.

La suddivisione per spessori è relativamente semplice, essendo questi standardizzati su determinati valori imposti dalle scheda di laminazione.

Nello specifico sono:

Spessori ultimi di sbazzatura [mm]

2	2,7	3	3,5	4	5	6	7	8	9	9,5
---	-----	---	-----	---	---	---	---	---	---	-----

Tabella 2.4 – Spessori ultimi di sbazzatura

Diverso è il discorso della larghezza. Quest'ultima ha una variabilità più ampia nel campione, più precisamente in un intervallo che parte da un minimo di 845mm ad un massimo di 1780mm. Di seguito è riportato l'istogramma delle frequenze con cui si ripetono le dimensioni trasversali delle bramme.

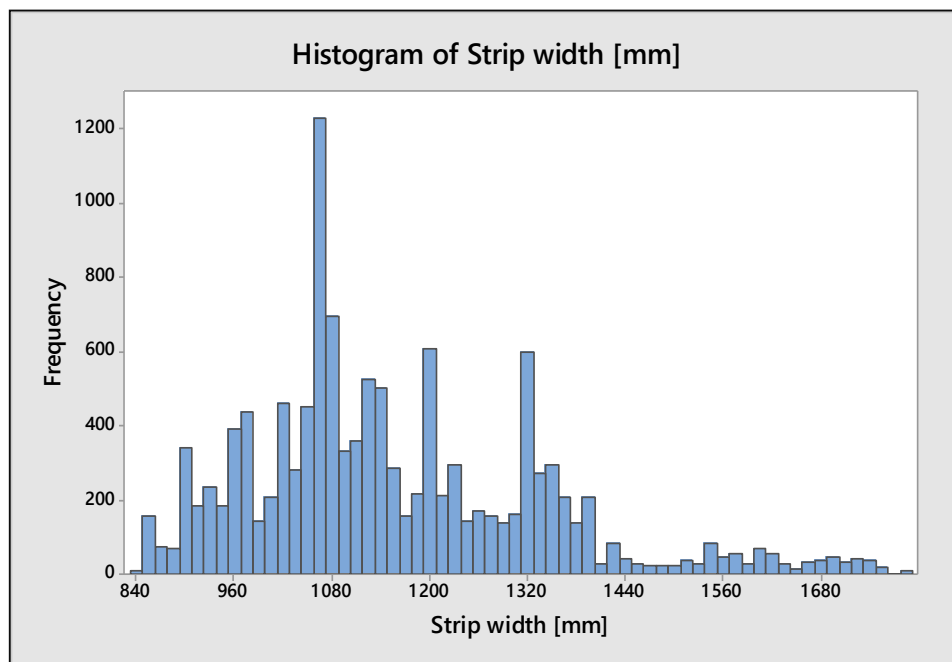


Figura 2.4 – Istogramma delle frequenze

Per semplificare la classificazione sono state quindi definite 5 classi di larghezza, secondo il seguente schema:

Classi di dimensione trasversale [mm]					
	A	B	C	D	E
Da	800	1000	1200	1400	1600
Fino a	1000	1200	1400	1600	1800

Tabella 2.5 – Classi di larghezza

Nella fase di elaborazione statistica, sono state utilizzate queste classi, insieme al codice lega e allo spessore, per differenziare le singole carte di controllo sono stati trascurati dall'analisi, le popolazioni che a seguito di queste classificazioni hanno presentato un campione inferiore alle 10 unità.

2.5 Risultati delle carte di controllo

Per brevità di discorso son qui riportati direttamente i risultati ottenuti. Il dettaglio delle carte di controllo è riportato in appendice (*par. A.1*).

lega	spessore	larghezza	Coil con Crown fuori limiti	Coil con Crown fuori soglia di allarme	N° coil
1050	6 mm	A	13	21	22
		B	11	31	56
		C	3	14	36
	7 mm	D	0	9	52
	9,5 mm	B	0	11	24
		C	4	11	16
1200	4 mm	A	31	49	60
		B	29	99	220
		C	35	116	234
1230	6 mm	C	7	17	18
	7 mm	C	13	50	89
	9,5 mm	C	15	38	72
3003	6 mm	B	6	31	99
		C	16	36	65
3005	3 mm	B	30	86	208
		C	13	35	87
	4 mm	A	0	5	34
		B	1	10	21
		C	15	54	151
		D	1	5	10
		E	3	8	16
	6 mm	A	14	133	266
		B	7	35	79
3105	4 mm	B	3	13	31
		C	2	12	17
	6 mm	A	80	185	221
		B	96	465	1038
		C	4	27	70
4006	6 mm	D	70	171	220
	9,5 mm	C	8	70	139
		D	7	48	182
5052	6 mm	A	166	267	278
		B	454	549	574
5754	5 mm	A	59	96	105
		B	67	74	75
		C	17	22	26
		D	0	9	14
8006	2,7 mm	B	42	219	572
		C	78	263	573
	4 mm	C	3	6	20
		D	13	51	121
		E	28	89	187

Continua a pagina successiva

Continua da pagina precedente					
8009	3 mm	A	16	54	100
		B	59	197	473
		C	61	179	398
	4 mm	D	7	21	57
		E	5	12	22
	6 mm	A	19	42	75
		B	60	243	584
		C	56	179	479
		D	13	71	170
		E	25	58	93
8011	4 mm	A	7	14	15
		B	9	49	117
		C	5	19	37
	5 mm	A	225	502	629
		B	128	521	1134
		C	22	141	408
8079	4 mm	A	189	313	370
		B	39	187	388
		C	15	108	298
		D	2	10	29
		E	7	19	57
TOTALE			2433 19,7%	6479 52,5%	12331

Tabella 2.6 – Tabella riepilogativa dei risultati delle carte di controllo

Dai risultati delle carte di controllo (vedi Tabella 2.6) si evince che su un totale di 12331 nastri analizzati, 2433, che corrispondono a circa il 20% della produzione totale, mostrano un valore di Crown al di fuori dell'intervallo di specifica [0 – 1].

La situazione più critica si manifesta con i nastri appartenenti alla Serie 5000; dove il 73% dei nastri di 5052 e il 65% dei nastri 5754 sono fuori specifica. La situazione migliore si ha invece con le leghe della serie 3000; infatti solo il 13% dei nastri 3003 e 3105, e il 10% dei nastri di 3005 mostra un valore di Crown non accettabile.

Resta comunque il dato di poca accuratezza del processo, visto l'alto numero di nastri, superiore al 40%, con valore all'interno dei limiti ma esterni all'intervallo ottimale di Crown [0,25 - 0,75].

Attenzione particolare va alle osservazioni relative alla serie 8000, che ha un peso considerevole, dato che copre da sola il 60% della produzione totale. In questo caso si ha un percentuale di coil fuori specifica inferiore alla media generale per le leghe: 8006(11%), 8009(13%) e 8011(17%); mentre si registra un 22% per la lega 8079.

	% Coil fuori limiti [0; 1]	% Coil fuori soglia di allarme [0,25; 0,75]
1050	15%	47%
1200	18%	51%
1230	20%	59%
3003	13%	41%
3005	10%	43%
3105	13%	51%
4006	16%	53%
5052	73%	96%
5754	65%	91%
8006	11%	43%
8009	13%	43%
8011	17%	53%
8079	22%	56%

(*) percentuali rapportate al totale dei nastri laminati per ciascuna lega

Tabella 2.7 – Percentuale di nastri fuori specifica

2.6 Correlazioni numeriche

Con le carte di controllo è stata ricavata una “fotografia” della produzione allo sbozzatore ed è stato evidenziato una percentuale non trascurabile del 20% di nastri fuori specifica.

Il passo successivo è quello di cercare i parametri che determinano le oscillazioni del profilo di spessore. Si è quindi ricorso ad una analisi di correlazione, mediante l'utilizzo di grafici a dispersione, e il calcolo degli indici di correlazione.

Nello specifico si è proceduto alla ricerca di eventuali correlazioni tra il valore di crown (Cxx%) per ciascuna categoria (lega, spessore, larghezza), ed i relativi parametri di processi ricavati dal database aziendale.

In particolare sono stati valutati per ogni *coil* i valori di:

- a. Rigidezza media all'ultimo passo calcolata dal sistema (*Stiffness average main*).
- b. Valore medio di bending idraulico all'ultimo passo (*Bending average main*).
- c. Carico di laminazione medio all'ultimo passo (*Force Sum Avg. Main*).
- d. Apertura media dei cilindri all'ultimo passo (*Gap Avg. Main*).
- e. Temperatura di avvolgimento nastro (*Temperature pyro exit*).
- f. Riduzione ultimo passo (*Draft Main*).

Per ognuno di questi parametri è stato calcolato l'indice di correlazione di Pearson nei confronti del valore percentuale di crown.

Tale indice permette di individuare eventuali relazioni di linearità tra le due variabili prese in considerazione. Esso è definito come il prodotto delle covarianze delle singole variabili, divise per il prodotto delle deviazioni standard:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Dove:

- ✓ σ_{XY} è la covarianza tra X e Y
- ✓ σ_X e σ_Y sono le due deviazioni standard

Il coefficiente di correlazione può assumere valori compresi tra -1 e 1.

Dove "1" corrisponde ad una **piena correlazione diretta**, ossia oltre ad esserci un legame lineare dei valori sono concordi anche i segni delle due variabili.

Al contrario “-1” indica una **piena correlazione inversa**, in cui i segni sono opposti. Un valore pari a “0”, indica invece una **correlazione nulla**, non esiste alcun legame tra le due variabili considerati.

Valori intermedi dell’indice Pearson, indicano diversi gradi di correlazione, ossia la “forza” con la quale la variabile X è in grado di influenzare la variabile Y e viceversa.

- $0 < \rho_{XY} < 0,3$ Correlazione debole
- $0,3 < \rho_{XY} < 0,7$ Correlazione media
- $\rho_{XY} > 0,7$ Correlazione forte

Di seguito i risultati delle correlazioni:

<i>Correlazione Crown con:</i>	<i>Indice di Correlazione</i>
Stifness average main	0,63
Bending average main	0,25
Force Sum Avg. Main	0,68
Gap Avg. Main	-0,03
Temperature pyro exit	0,33
Draft Main	-0,10

Tabella 2.8 – Indici di correlazione

Dalla tabella si può notare che, il bending, la temperatura di uscita, la riduzione all’ultimo passo, ed il gap non hanno una correlazione significativa con il crown.

Al contrario sia il **carico di laminazione**, che la **rigidezza del materiale** calcolata dal sistema, mostrano una correlazione significativa, e ciò lo si può notare anche dai grafici a dispersione riportati di seguito.

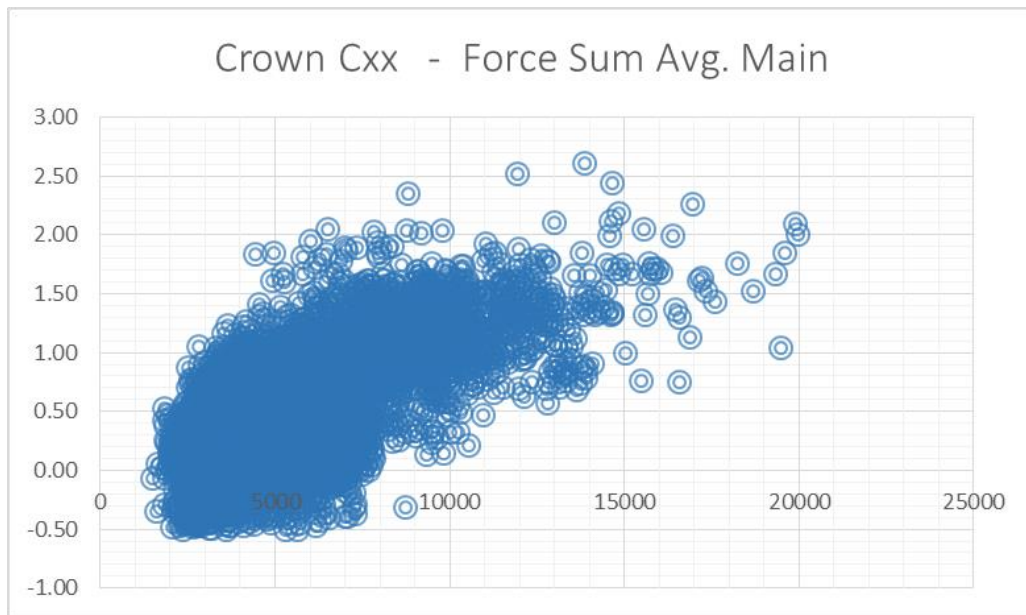


Figura 2.5 – Correlazione Crown e Force Sum Avg Main: Grafico a dispersione

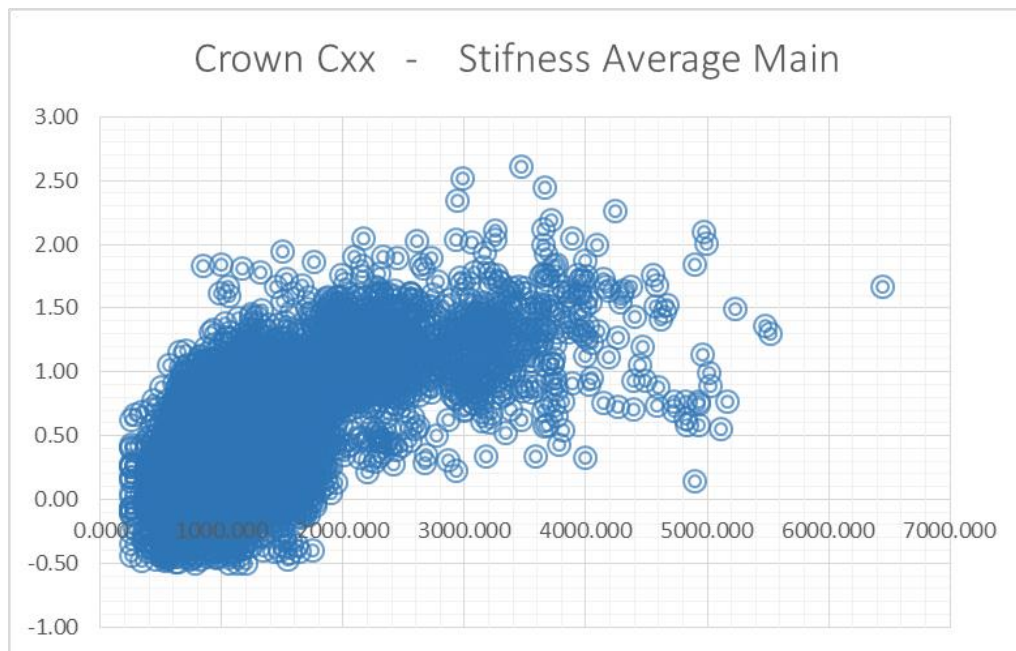


Figura 2.6 – Correlazione Crown e Stiffness Avg Main: Grafico a dispersione

I due grafici sono qualitativamente simili, come anche i valori di correlazione. Ciò è una deduzione ovvia poiché i due parametri di forza e rigidezza sono strettamente legati l'uno all'altro.

In ogni caso tale evidenza non aggiunge informazioni in più, ma conferma ciò che si era già capito dall'analisi delle carte di controllo, in cui le leghe più dure, appartenenti alla famiglia 5000, manifestano valori mediamente più alti di Crown, con percentuali più alte di fuori specifica.

Si può quindi affermare che il crown non mostra una esplicita dipendenza dai parametri misurabili dei sensori del laminatoio.

Per i motivi suddetti è stato scelto di utilizzare l'Analisi Numerica per lo studio dei parametri che influenzano in modo significativo il fenomeno di Crown.

CAPITOLO 3

ANALISI NUMERICA**3.1 Introduzione**

Nel presente capitolo verrà illustrato come è stato utilizzata l'Analisi numerica ed in particolare il metodo agli elementi finiti per lo studio dei fenomeni che concorrono alla determinazione del *CROWN*.

L'obiettivo è stato la costruzione di un modello FE ⁷ in grado di riprodurre, in maniera più fedele possibile alla realtà, il processo di laminazione a caldo di una bramma di alluminio, a partire dai dati messi a disposizione dalla Laminazione Sottile Spa.

Il metodo agli elementi finiti (*Finite Element Method*) trova inizialmente origine nella necessità di risolvere problemi complessi di cui non è possibile o è troppo oneroso ricavare una soluzione analitica esatta.

Il principio base è quello di suddividere il dominio del problema in più sottodomini di forma semplice, gli elementi finiti appunto.

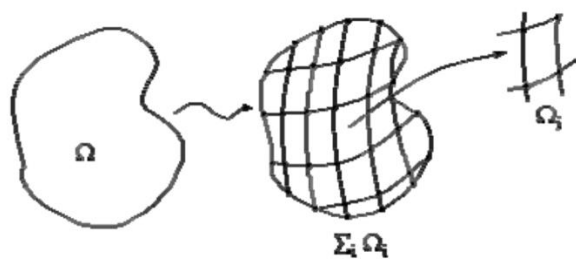


Figura 3.1 – FEM: discretizzazione del dominio

⁷ FE: Finite element

3.2 Simufact forming

Il modello agli elementi finiti del processo di laminazione è stato sviluppato all'interno dell'ambiente *Simufact forming® versione 12.0*, sviluppato dalla *Simufact engineering GmbH*, del gruppo MSC Software, leader nello sviluppo di codici FE commerciali.

La licenza di prova del software è stata concessa dalla Msc Software Italia, al Dipartimento di ingegneria chimica dei materiali e della produzione industriale (*DiCMaPI*) dell'Università di Napoli "Federico II", presso il quale è stato svolto parte del lavoro di Dottorato.

Tale software è stato specificatamente realizzato per la simulazione di processi di produzione, la sigla Simufact sta infatti per *Simulation Manufacturing*.

Come tutti i software commerciali FEM è composto da un pre/post processore e da un solutore.

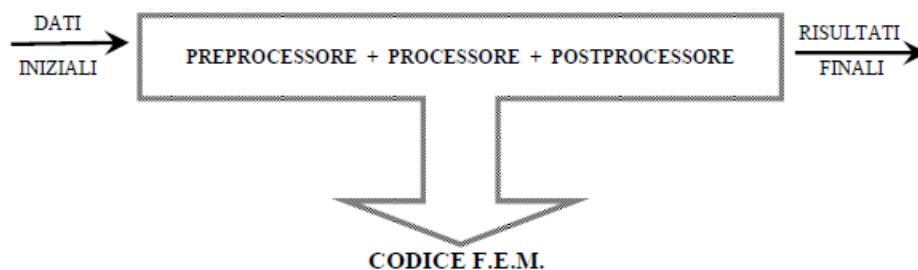


Figura 3.2 – Schema funzionamento software FEM

L'ambiente *forming* è il pre/post processore, mediante il quale è possibile costruire la struttura del modello, ed impostare tutti i dati geometri e di carico della simulazione. Una volta costruito il modello, questo deve essere inviato al solutore, che è solitamente un applicativo esterno, automaticamente richiamato dal preprocessore all'avvio dell'analisi.

Nello specifico simufact dispone di due solutori differenti, uno implicito ed uno esplicito, entrambi specifici per lo studio di problemi non lineari, ma che utilizzano due approcci differenti per la risoluzione del problema. Essi sono:

Per lo specifico caso di studio, è stato utilizzato il solutore implicito *Sf Marc*. Tale scelta obbligata per la modellazione del processo di laminazione ed è direttamente suggerita dal software.

Una delle potenzialità di Simufact, è infatti la presenza di specifici tool, detti *Application module*, che configurano le impostazioni generali in relazione al tipo di lavorazione che si intende simulare.

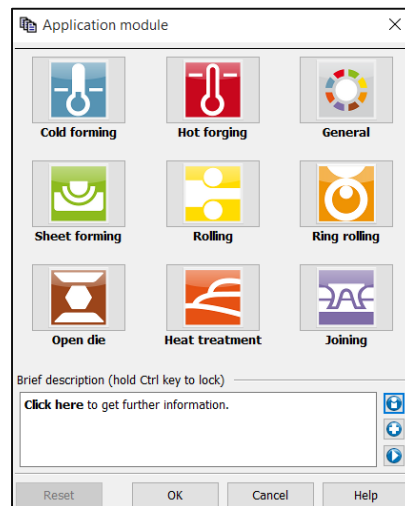


Figura 3.3 – Application module

3.3 Ipotesi

Effettuare un'analisi numerica di un determinato problema fisico, prevede innanzitutto la costruzione di un modello, ossia una schematizzazione delle condizioni reali in cui avviene il fenomeno. Data la complessità intrinseca dei fenomeni reali, e nel caso specifico del processo di laminazione a caldo, è necessario semplificare facendo delle ipotesi. Dall'analisi dei risultati si verifica poi il livello di approssimazione raggiunto e la validità o meno delle ipotesi fatte.

Come visto nel paragrafo il crown è influenzato da diversi fattori, la cui interazione reciproca non è di facile previsione, e sono:

- I. *Flessione dei cilindri*
- II. *Bombatura di rettifica (camber)*
- III. *Bombatura termica*
- IV. *Bombatura idraulica (roll bending)*

Nell'analisi numerica effettuata non sono stati considerati tutti i fattori, ma sono stati necessariamente trascurati determinati elementi, per motivi legati alle tempistiche di costruzione e di onerosità computazione del modello.

Nella fattispecie si è tenuto conto del primo fenomeno, ossia della *flessione del cilindro* dovuto al carico di laminazione, andando a considerare il cilindro di lavoro deformabile.

È stato poi considerata la *bombatura termica* dovuta al riscaldamento del cilindro durante la lavorazione. Tuttavia per quest'ultimo fattore è stata considerata solo la dilatazione direttamente imputabili ai passi simulati, trascurando quindi le dilatazioni preesistenti dovute ai precedenti passi di laminazione. Ciò è dovuto alla mancanza di dati aziendali sufficientemente precisi, che permettessero di realizzare un adeguato profilo di temperatura del cilindro, con la valutazione delle reali dilatazioni termiche.

3.4 Tipologia di analisi

L'analisi numerica svolta, è un'analisi di tipo non lineare termo-meccanica accoppiata. La si definisce **non lineare**, poiché, come già detto nelle sezioni precedenti, si tratta di un processo per deformazione plastica, in cui il legame tra carichi e deformazioni ricade nel campo di non linearità del materiale. A ciò si aggiunge la non linearità geometrica legata ai *grandi spostamenti* e deformazioni che subisce il

laminato in lavorazione, da cui deriva la necessità di dover imporre le equazioni di equilibrio sulla struttura deformata.

È definita **termo-meccanica** accoppiata, poiché si tiene conto non solo degli effetti meccanici di deformazione del metallo, ma anche quelli relativi alla generazione e alla conduzione di calore tra i vari corpi durante il processo, e dell'influenza di questo sulla resistenza a deformazione del materiale.

3.5 Scelta dei passi e scheda di laminazione

La bramma di alluminio, prima di raggiungere le sue dimensioni finali subisce un numero elevato di “passate” attraverso i cilindri, che ne modificano completamente la sezione originaria. Tali consistenti deformazioni fanno sì che difficilmente una determinata deformazione impressa nelle prime fasi della laminazioni, possa avere influenza sulla configurazione finale allo stesso modo di quelle impresses negli ultimi passi di laminazione.

A rafforzare tale ipotesi è il dato che tutta la lavorazione avviene a caldo, dove la resistenza del materiale alla deformazione è fortemente limitata dai fenomeni di ricristallizzazione che di fatto annullano l'incrudimento del materiale. In pratica il materiale non ha memoria o quasi delle deformazioni precedenti, e può essere modellato con un comportamento elasto-plastico perfetto senza incrudimento.

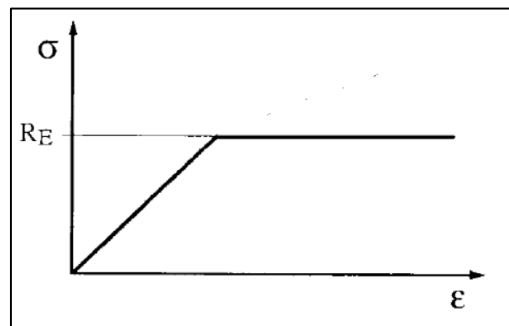


Figura 3.4 – Legame σ - ϵ per un materiale a comportamento elastico senza incrudimento

Per tale motivo, e in accordo con i responsabili della produzione presso il laminatoio sbozzatore, si è assunta l'ipotesi che ai fini della determinazione del Crown siano significativi solamente gli ultimi tre passi di laminazione.

Per la costruzione del processo è stata presa come riferimento la scheda di laminazione più frequentemente utilizzata, ossia quella delle lega 8009 con spessore finale di sbozzatura 6mm (*vedi figura sotto*).

La scheda prevede il susseguirsi di 24 passi di laminazione con riduzioni di spessore percentuali crescenti, fino al raggiungimento dello spessore finale di 6mm. Di seguito sono riportati le riduzioni inerenti i passi implementati nella simulazione.

Scheda di laminazione					
Passo	Spessore in ingresso [mm]	Spessore in uscita [mm]	Riduzione [mm]		Velocità angolare cilindri [rad/s]
22	32	19	13	40,63%	7,4
23	19	11	8	42,11%	6,1
24	11	6	5	45,45%	5,4

Tabella 3.1 – Scheda di laminazione lega 8009: ultimi 3 passi

Per scheda di laminazione si intende una tabella in cui sono indicati tutti i parametri di cui il laminatoio ha bisogno per eseguire la lavorazione. Tale tabella è costruita in automatico dal software del laminatoio una volta inseriti nel sistema i dati relativi alla tipologia di lega, le dimensioni iniziali del lingotto, e le riduzioni da effettuare per ogni passo. Il software calcola mediante algoritmi interni gli altri parametri di cui necessita ed effettua anche una previsione di massima del carico di laminazione necessario, della temperatura di ogni passo e del crown. Tale *routine* non è però esente da errori, per questo motivo gli ingegneri possono successivamente intervenire manualmente e correggere determinati parametri della scheda.

Installed Power [kW]	7360	No	Exit [mm]	Force [kN]	Bend [%]	V_Mill [m/min]	Draft [mm]	Reduct. [%]	Length [m]	Cox [%]	Temp [°C]	TenLeft [N/mm2]	TenRight [N/mm2]	Kwn [N/mm2]	Phi	Power [kW]	Torque [kNm]
Alloy	8009	1	595.00	1.688.82	30.00	120.00	5.00	0.83	5.04	0.01	559.86	0.00	0.00	29.83	0.01	274.00	67.82
Main Drive Overload Factor	1	2	575.00	3.388.43	30.00	120.00	20.00	3.36	5.22	0.01	560.24	0.00	0.00	29.29	0.04	1.110.64	274.90
Work Roll Diameter [mm]	990	3	553.00	3.492.92	30.00	120.00	22.00	3.83	5.42	0.01	560.66	0.00	0.00	28.68	0.08	1.144.88	283.38
Slab Length [mm]	5000	4	531.00	3.424.41	30.00	120.00	22.00	3.98	5.65	0.01	561.09	0.00	0.00	28.08	0.12	1.121.95	277.70
Slab Width [mm]	1110	5	507.00	3.506.58	30.00	120.00	24.00	4.52	5.92	0.01	561.57	0.00	0.00	27.42	0.17	1.148.20	284.20
Initial Thickness [mm]	600	6	483.00	3.429.62	30.00	120.00	24.00	4.73	6.21	0.01	562.06	0.00	0.00	26.76	0.22	1.122.19	277.76
Entry Thickness [mm]	600	7	459.00	3.354.01	30.00	150.00	24.00	4.97	6.54	0.02	562.56	0.00	0.00	26.11	0.27	1.370.69	271.42
Target Thickness [mm]	6	8	435.00	3.280.41	30.00	150.00	24.00	5.23	6.90	0.02	563.07	0.00	0.00	25.47	0.32	1.339.37	265.22
Parabolic Work Roll Crown [µm]	-300	9	407.00	3.470.52	30.00	150.00	28.00	6.44	7.37	0.02	563.70	0.00	0.00	24.75	0.39	1.778.22	352.11
Limit Roll Force [kN]	20000	10	379.00	3.387.60	30.00	150.00	28.00	6.88	7.92	0.02	564.35	0.00	0.00	24.06	0.46	1.734.22	343.40
Limit Roll Torque [kNm]	1757	11	340.00	3.920.16	30.00	150.00	39.00	10.29	8.82	0.02	565.35	0.00	0.00	23.19	0.57	2.414.26	478.06
Exit Thickness First Pass [mm]	595	12	301.00	3.827.50	30.00	150.00	39.00	11.47	9.97	0.02	566.43	0.00	0.00	22.44	0.69	2.351.12	465.56
Limit Draft First Pass [mm]	5	13	262.00	3.772.70	30.00	150.00	39.00	12.96	11.45	0.03	567.62	0.00	0.00	21.87	0.83	2.309.09	457.23
Limit Draft [mm]	39	14	223.00	3.771.56	30.00	150.00	39.00	14.89	13.45	0.03	568.98	0.00	0.00	21.54	0.99	2.296.07	454.66
Limit Reduction [%]	50	15	184.00	3.846.73	30.00	180.00	39.00	17.49	16.30	0.04	570.61	0.00	0.00	21.53	1.18	2.786.39	459.79
Roll Force Last Pass [kN]	0	16	154.00	3.444.31	30.00	180.00	30.00	16.30	19.48	0.05	571.85	0.00	0.00	21.78	1.36	2.045.63	337.55
Relative Tension Left [N/mm²]	6	17	123.00	3.703.91	30.00	180.00	31.00	20.13	24.39	0.06	573.48	0.00	0.00	22.31	1.58	2.669.24	440.46
Relative Tension Right [N/mm²]	6	18	90.00	4.185.87	30.00	180.00	33.00	26.83	33.33	0.09	575.57	0.00	0.00	23.13	1.90	2.913.04	480.69
No Of Tension Passes	2	19	60.00	4.447.43	30.00	250.00	30.00	33.33	50.00	0.13	578.30	0.00	0.00	23.89	2.30	4.124.17	489.99
Target Cox Value [%]	0	20	42.00	3.642.94	30.00	250.00	18.00	30.00	71.43	0.18	578.97	0.00	0.00	24.15	2.66	2.786.48	331.06
Max. Bending (+/-) [%]	50	21	32.00	2.766.23	30.00	250.00	10.00	23.81	93.75	0.21	575.17	0.00	0.00	24.25	2.93	1.721.32	204.51
Slab Entry Temperature [°C]	570	22	19.00	3.986.80	-100.00	220.00	13.00	40.63	157.89	0.52	565.14	0.00	0.00	25.14	3.45	2.361.20	318.79
Slab Target Temperature [°C]	0	23	11.00	3.978.39	-100.00	180.00	8.00	42.11	272.73	0.90	522.15	0.00	6.00	28.61	4.00	1.780.12	293.74
Minimum Speed for Slabtemp [m/min]	100	24	6.00	4.686.75	-30.00	160.00	5.00	45.45	500.00	1.56	408.62	4.20	6.00	35.09	4.61	2.060.95	382.59
<input checked="" type="checkbox"/> Even number of passes	<input checked="" type="checkbox"/> Consider Length																
<input type="checkbox"/> Bending 100%	<input type="checkbox"/> Bending equal last 3 passes																

Figura 3.5 – Esempio di scheda di laminazione lega 8009

3.6 Condizioni di simmetria

Per ridurre il numero di elementi e quindi l'onere computazionale del modello, è sempre preferibile ricorrere a schemi semplificati sfruttando le condizioni di simmetria del problema. La sola simmetria geometrica però non basta, è necessario che sia verificata anche una condizione di simmetria per le forze ed i carichi in generale. Se ciò non fosse gli spostamenti e le deformazioni derivanti dalle condizioni di carico non sarebbero ribaltabili da una parte all'altra dello schema geometrico, con la conseguenza di aver calcolato dei valori che non hanno alcuna attinenza con il fenomeno reale.

Nella fattispecie del caso in oggetto, si può notare come, per le ipotesi fatte, il modello goda di una doppia simmetria rispetto al piano orizzontale e verticale. Ciò ci permette di non dover modellare le strutture interamente, ma solo un quarto dell'insieme complessivo.

Il laminato ha infatti la forma di un parallelepipedo regolare a sezione rettangolare e come tale gode di 3 piani di simmetria, lungo la mezzeria di ogni spigolo. Analogamente il cilindro gode di infiniti piani di simmetria diametrali e un piano di simmetria trasversale. Per quanto riguarda le condizioni di carico, l'imbocco del laminato avviene in maniera perfettamente centrata rispetto all'apertura dei cilindri, e di conseguenza anche l'azione deformativa dei cilindri è simmetrica rispetto all'ipotetico piano passante per la mezzeria del gap.

I cilindri possono essere schematizzati come una trave appoggiata-appoggiata con un carico distribuito, tale tipologia di schema di carico è simmetrico rispetto alla mezzeria della trave.

Da quanto detto possiamo ritenere verificata sia la condizione di simmetria geometrica che quella di carico.

Quindi ricapitolando si ha (*vedi Figura 3.6*):

- Un piano orizzontale passante per la mezzeria dello spessore del laminato
- Un piano verticale passante per la mezzeria dei cilindri e del laminato nel senso della larghezza

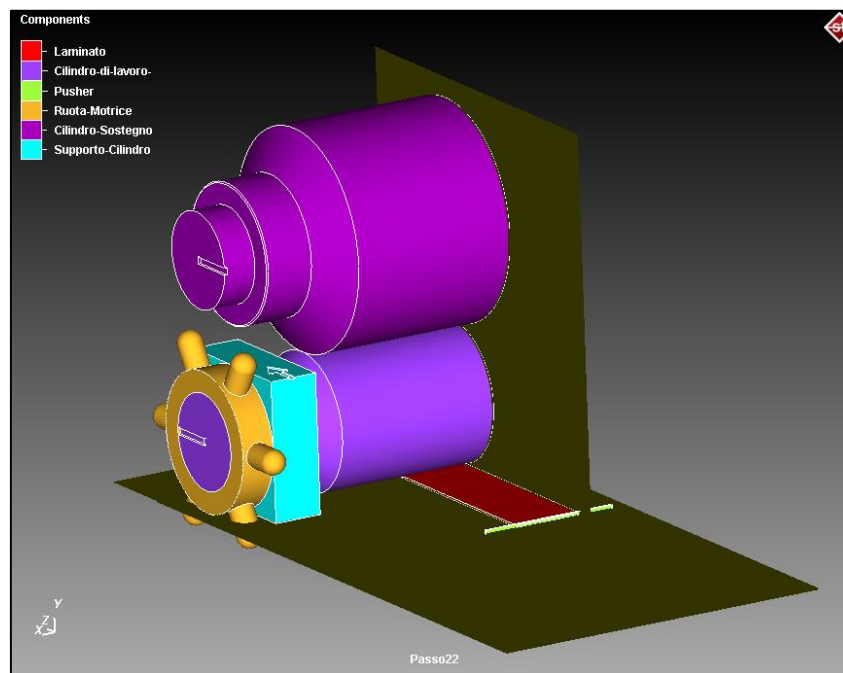


Figura 3.6 – Schema simmetrico del modello

3.7 Costruzione del modello

Per la costruzione del modello col software Simufact Forming 12.0, è necessario come prima operazione selezionare l'upsetting "rolling" tramite l'apposito menù (vedi Figura 3.3).

Selezionata la tipologia di lavorazione che si intende simulare, si apre un altro menù in cui definire una serie di parametri preliminari, nello specifico:

- Il tipo di processo, ossia laminazione piana (flat rolling).
- La dimensione della simulazione, 3d in questo caso.
- Il tipo di solutore, che per la laminazione ha un sola opzione, ossia Elementi Finiti (vedi par. 3.2). (In altre lavorazioni è possibile utilizzare anche il metodo dei volumi finiti, e solutore esplicito).
- La temperatura dell'ambiente.
- La tipologia di lavorazione, se a caldo o a freddo.
- Il numero di utensili (Dies).

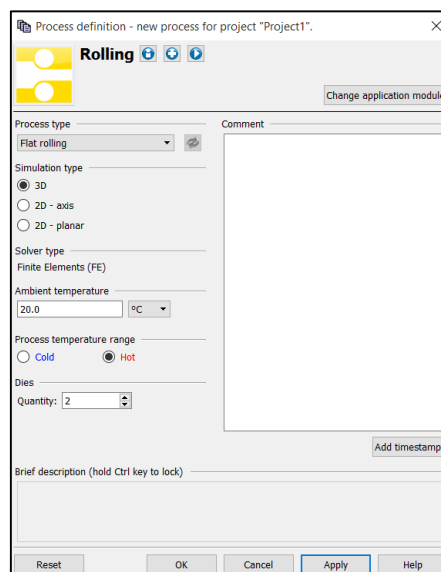


Figura 3.7 – Application module

Fatto ciò sulla destra della schermata comparirà l'albero dinamico del modello con il presetting impostato.

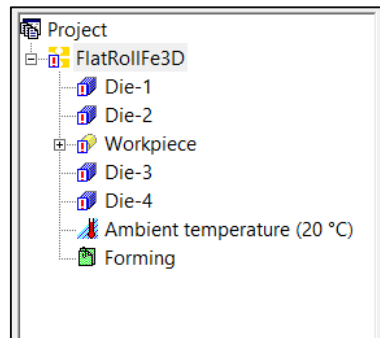


Figura 3.8 – Albero dinamico di Simufact forming 12.0

È quindi sufficiente trascinare gli elementi dalla finestra “inventario” sotto la corrispondente voce dell'albero dinamico, per assegnare geometrie e proprietà ai singoli elementi, siano essi *workpiece* o *dies*.

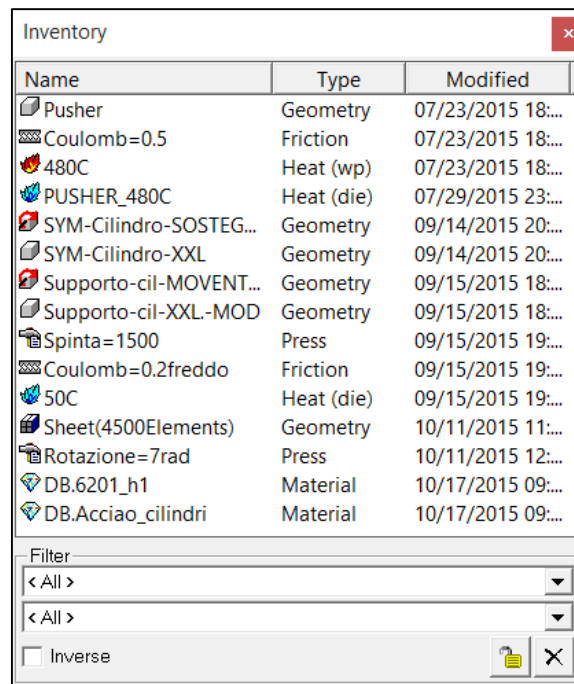


Figura 3.9 – Schermata “inventario” di Simufact forming 12.0

3.8 Costruzione delle geometrie

Il primo passo per la costruzione di un modello agli elementi finiti, è la creazione delle geometrie. Nonostante il software sia dotato di un ambiente CAD interno, si è preferito modellare le geometrie esternamente tramite il software CAD SolidWorks 2015® e successivamente importate nell'ambiente FEM, eccezion fatta per il laminato, di cui è stato generato direttamente il modello FE tramite un apposito *tool*.

I cilindri del laminatoio sono stati modellati in base alle dimensioni reali dell'impianto Mino© installato presso la *Laminazione Sottile s.p.a.*

In accordo con le ipotesi di simmetria, è stata modellata solo metà di ciascuna parte (un quarto per il laminato che gode della doppia simmetria).

Il modello geometrico si compone quindi di:

I. *Cilindro di Lavoro (working roll)*

È un cilindro a tavola piana, con un diametro nella parte maggiore di 990mm, e una lunghezza della *tavola di laminazione*⁸ di 2400mm.

⁸ Per tavola di laminazione si intende la parte centrale del cilindro a contatto con il laminato. La lunghezza della tavola definisce la larghezza massima laminabile dalla gabbia

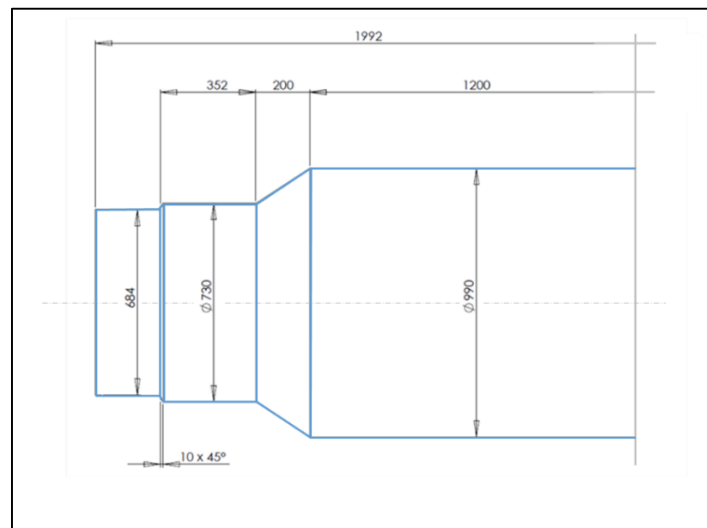


Figura 3.10 – Disegno costruttivo del semi-cilindro di lavoro

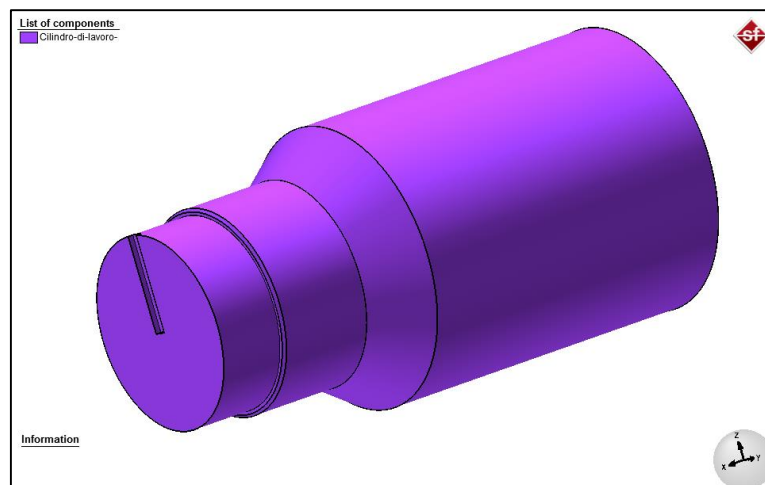


Figura 3.11 – modello 3D del semi-cilindro di lavoro

II. Cilindro di sostegno (backup roll)

È anch'esso un cilindro a tavola piana, di diametro maggiore per aumentare il momento di inerzia polare e conferire rigidità alla gabbia di laminazione. Il diametro è di 1575mm, con un tavola di laminazione totale di 2400mm

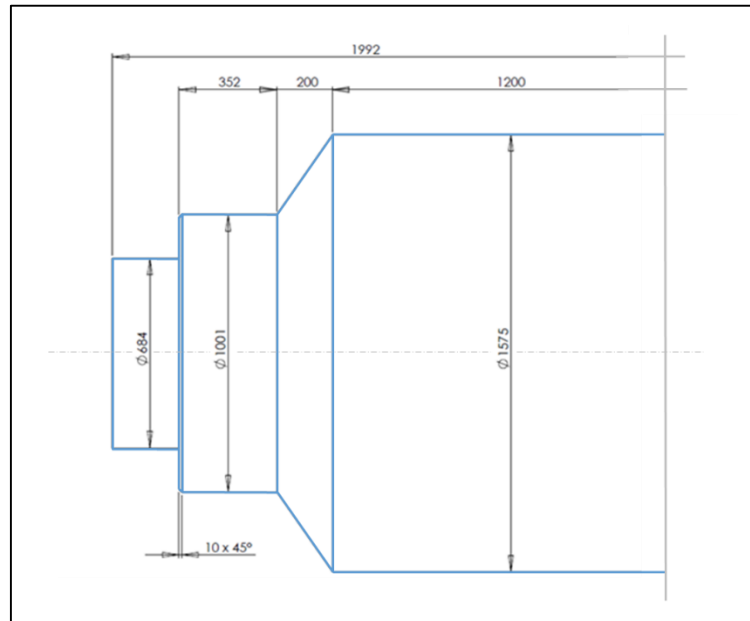


Figura 3.12 – Disegno costruttivo del semi-cilindro di sostegno

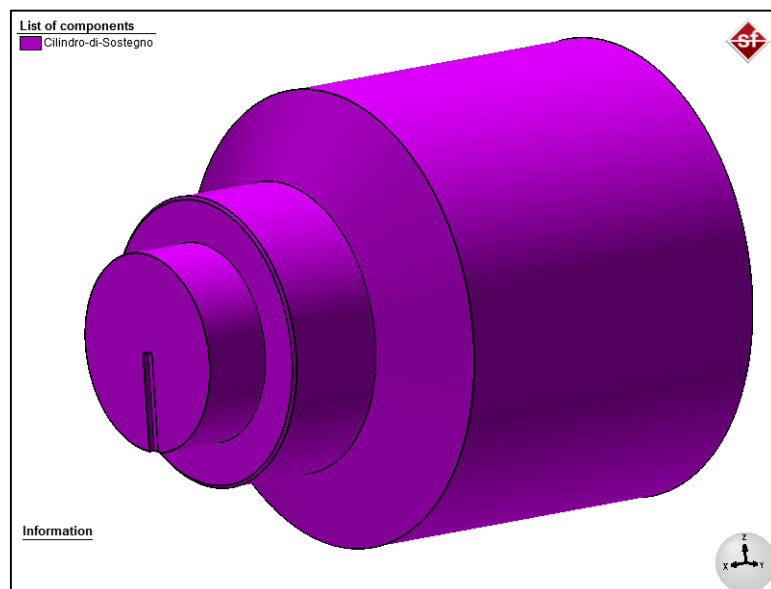


Figura 3.13 – Modello 3d del semi-cilindro di sostegno

III. Laminato

Per la costruzione della geometria del laminato di partenza sono state utilizzati i dati della scheda di laminazione. Nello specifico per il primo passo simulato, corrispondente al 22esimo passo dalla scheda di laminazione, si ha uno spessore in ingresso alla gabbia di 32mm. Per la larghezza si è scelto il valore più ricorrente nella

produzione 2014, pari a 1000mm. Ovviamente tali dimensioni sono state opportunamente dimezzate in virtù delle condizioni di simmetria sopra descritte (vedi par. 3.6).

Per motivi legati alla riduzione dei tempi di calcolo, non è stata considerata la lunghezza reale del laminato, ma solo una porzione di 1500mm, sufficiente per lo studio del processo.

Dimensioni del semi-laminato	
<i>Spessore</i>	16 mm
<i>Larghezza</i>	500 mm
<i>Lunghezza</i>	1500 mm

Tabella 3.2 – dimensioni del semi-laminato

Per i successivi passi di laminazione, sono state importate le geometrie del laminato al termine del singolo passo, la cui geometria non è quindi regolare e le dimensioni sono funzione del processo deformativo subito.

IV. Supporto cilindro

Per poter posizionare correttamente il cilindro di lavoro e mantenerlo in sede durante il processo di laminazione, è stato necessario modellare una geometria aggiuntiva che simuli l'effetto della guarnitura presente nella gabbia di laminazione.

Tale geometria che funge da supporto e da cuscinetto, non è altro che un parallelepipedo a sezione rettangolare con un foro centrale cui va alloggiato il cilindro di lavoro.

Dimensioni del supporto cilindro	
<i>Altezza (y)</i>	1000 mm
<i>Larghezza (x)</i>	1000 mm
<i>Profondità</i>	352 mm
<i>Foro</i>	Ø 730 mm

Tabella 3.3 – dimensioni del supporto cilindro

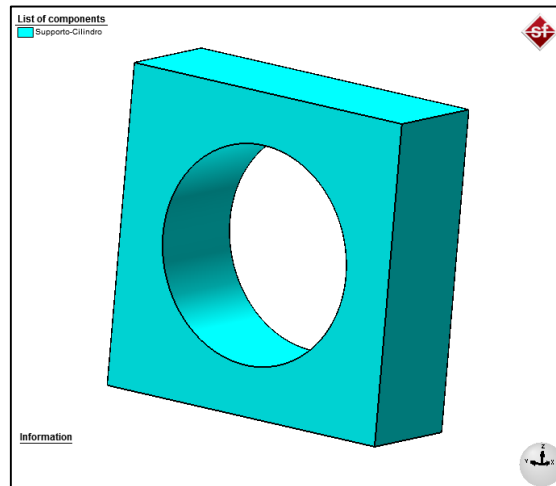


Figura 3.14 – Modello 3d del supporto

V. Ruota motrice

Per poter conferire la rotazione al cilindro di lavoro, è stata modellata una ruota motrice, che collegata rigidamente alla parte più esterna del cilindro, tramite un contatto “glued”, permette a quest’ultimo di muoversi ed effettuare la lavorazione.

La geometria è costituita da un anello di diametro interno di 684mm. Le altre dimensioni sono state scelte in maniera arbitraria non essendo influenti ai fini della simulazione. Le sporgenze sulla circonferenza esterna sono invece funzionali a determinare il corretto senso di rotazione della ruota durante la simulazione.

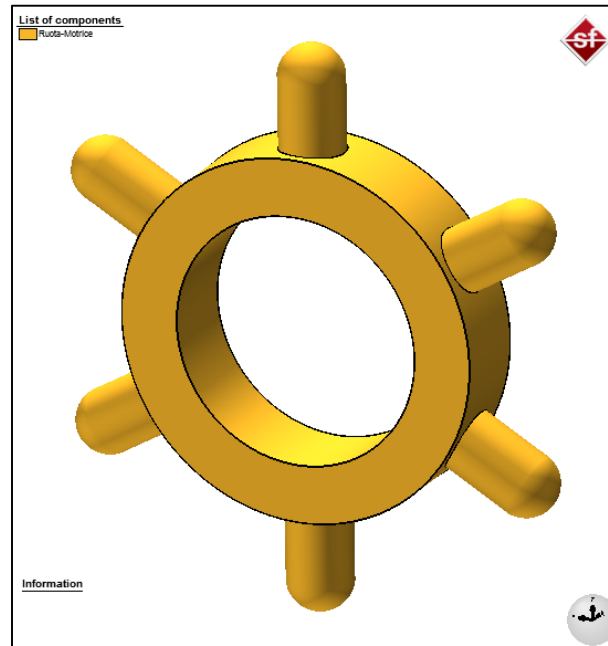


Figura 3.15 – Modello 3d della ruota motrice

VI. Pusher

Affinché la laminazione avvenga è necessario inizialmente spingere il laminato tra i due cilindri finché non è verificata la condizioni di trascinamento, per questo motivo è stata realizzata una piastrina atta a svolgere tale funzione.

<i>Dimensioni del Pusher</i>	
<i>Altezza</i>	60 mm
<i>Larghezza (x)</i>	1000 mm
<i>Profondità</i>	15 mm

Tabella 3.4 – dimensioni della piastra di spinta (pusher)

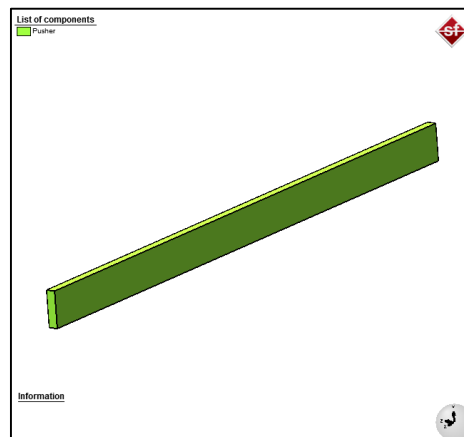


Figura 3.16 – Pusher

Una volta costruite le geometrie, esse sono state importate nell'inventario come file neutrale ".stl" tramite l'apposito comando *Geometry* → *From File*

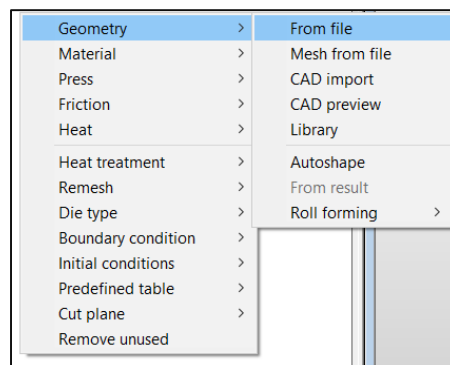


Figura 3.17 – Function: Geometry-From File

Dall'inventario le geometrie sono trascinate ed assegnate alle corrispondenti voci nell'albero dinamico.

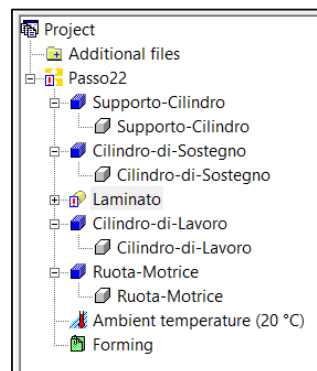


Figura 3.18 – Albero dinamico

Per il cilindro di lavoro, dovendo valutare gli effetti della sua deformazione durante il processo, è stato necessario modificare la tipologia di utensile in “*deformable die*”.

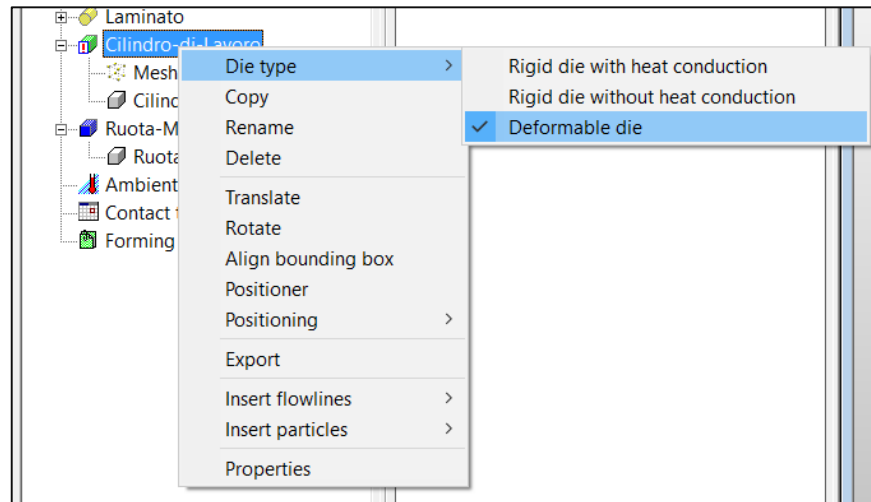


Figura 3.19 – Deformable die Function

Tutti gli altri “*dies*” sono invece considerati perfettamente rigidi senza conduzione di calore. Tale impostazione è stata scelta anche per il cilindro di sostegno, ciò è motivato dal fatto che la funzione di tale elemento è quella di conferire rigidità alla struttura. Non si commette quindi una grossa approssimazione a considerarlo perfettamente rigido. Tale approssimazione permette però di ridurre il numero di elementi complessivi, poiché in questo modo non è necessario *meshare* l’elemento.

Tutte le geometrie sono state poi correttamente posizionate ed orientate a formare l’assieme della gabbia di laminazione. In particolare sono state allineate le geometrie dei cilindri e del laminato con l’estremità sezionata in battuta al piano di simmetria verticale ($x=0$). Un faccia del laminato è stato posto in battuta al piano di simmetria orizzontale ($y=0$), coincidente col piano di riferimento e con la mezzeria del *gap*.

La luce di laminazione (*gap*), e di conseguenza l’allineamento lungo al direzione y del cilindro e delle geometrie ad esso connesso è differente per ogni passo, ed è pari a:

<i>n°Passo</i>	<i>Semi-apertura</i>
<i>Passo 22</i>	9.5 mm
<i>Passo 23</i>	5.5 mm
<i>Passo 24</i>	3 mm

Tabella 3.5 – Gap di laminazione

In funzione della necessità di lasciare tali valore di luce, la posizione delle geometrie rispetto lungo la direzione verticale (y) è la seguente:

<i>Geometria</i>	<i>Posizione dell'asse lungo y</i>		
	<i>Passo 22</i>	<i>Passo23</i>	<i>Passo24</i>
<i>Cilindro di lavoro</i>	504,5 mm	500,5 mm	498 mm
<i>Cilindro di sostegno</i>	1292 mm	1288 mm	1285,5 mm
<i>Sostegno cilindro *</i>	504,5 mm	500,5 mm	498 mm
<i>Ruota motrice</i>	504,5 mm	500,5 mm	498 mm
*Per questa geometria si fa riferimento all'asse di foro, che coincide con il baricentro della sezione			

Tabella 3.6 – Posizione delle geometrie lungo Y

3.9 Discretizzazione (Meshing)

Come accennato nel paragrafo precedente, per il laminato è stato creato direttamente il modello agli elementi finiti utilizzando il tool “*roll forming*”, specificatamente pensato per la laminazione.

Questo tool permette di creare una lastra iniziale, definendo in dettaglio la discretizzazione della geometria nelle tre direzioni.

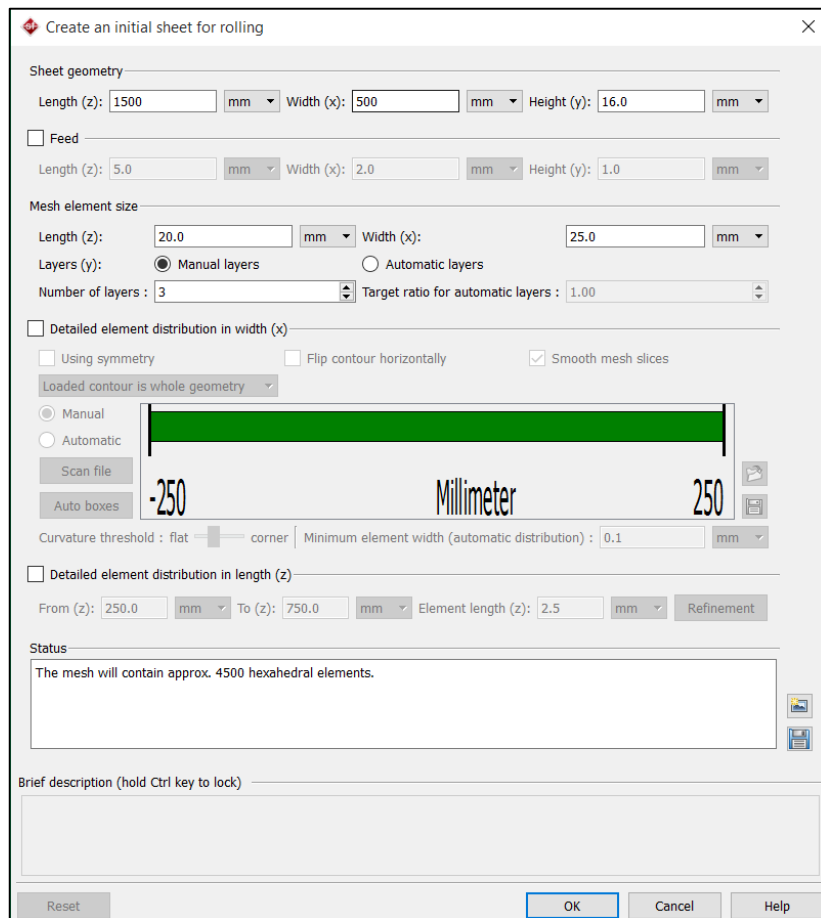


Figura 3.20 – Schermata del tool Roll Forming

Nello specifico si è scelta una lunghezza degli elementi di 25mm nel senso della larghezza (*asse x*), 20mm lungo la direzione di laminazione (*asse z*) e una stratificazione a 3 elementi nello spessore. La discretizzazione è stata eseguita utilizzando elementi Brick7 ad 8 nodi della libreria di Marc™.

Le dimensioni del nastro sono quelle indicate nella Tabella 3.2 del precedente paragrafo. È stato così creato un modello con approssimativamente 4500 elementi.

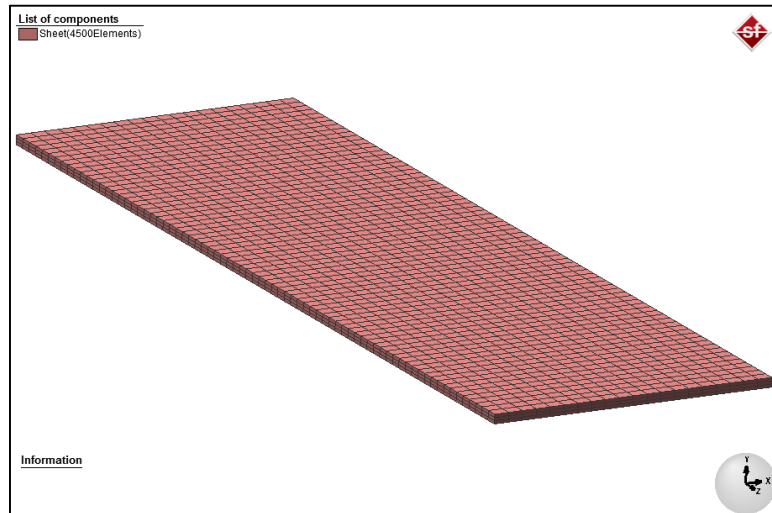


Figura 3.21 – Laminato

Per il modello FE del cilindro di lavoro si è invece partiti dalla geometria che è stata discretizzata utilizzando il mesher *s/Mesh Tetra*. Si tratta di un algoritmo di discretizzazione particolarmente adatto per le geometrie curve. Esso suddivide la geometria del cilindro in tanti elementi tetraedrici, nello specifico l'elemento Tet157 della libreria di Marc™.

Per ridurre al minimo possibile il numero di elementi, è stato utilizzato un *element edge length*⁹ elevato, pari a 200mm, in modo da ottenere una mesh grossolana.

Tuttavia per ridurre l'approssimazione della simulazione, è stato necessario affinare la mesh nelle zone a contatto con il laminato. Per tale scopo il software prevede la definizione di una “**refinement box**”, ossia un volume all'interno del quale la mesh viene infittita secondo uno specifico algoritmo.

Il principio di funzionamento prevede che gli elementi all'interno di questo volume siano suddivisi secondo una legge esponenziale del tipo:

$$(2^X)^{\text{Element Dimension}}$$

⁹ Si intende la dimensione massima degli spigoli di ciascun elemento durante la fase di discretizzazione.

Dove:

- X è il *Refinement Level* e può essere impostato a piacere, purché sia un numero intero;
- *L'element dimension*, è la dimensione dell'elemento finito, pari a 2 o 3 a seconda che sia bidimensionale o tridimensionale.

Nello specifico del caso in analisi è stato definito un Box di dimensioni 650x1000x1000 mm, lungo le direzioni x,y,z, ed è stato impostato un *refinement level* pari a 2. Trattandosi di elementi tetraedrici, quindi tridimensionali, si ha che ogni elemento originario è stato suddiviso in:

$$(2^2)^3 = 64 \text{ elementi}$$

Dalla figura seguente si può notare la differenza di discretizzazione tra la zona della refinement box in blu e la restante parte del cilindro. Il modello contiene approssimativamente 11000 elementi.

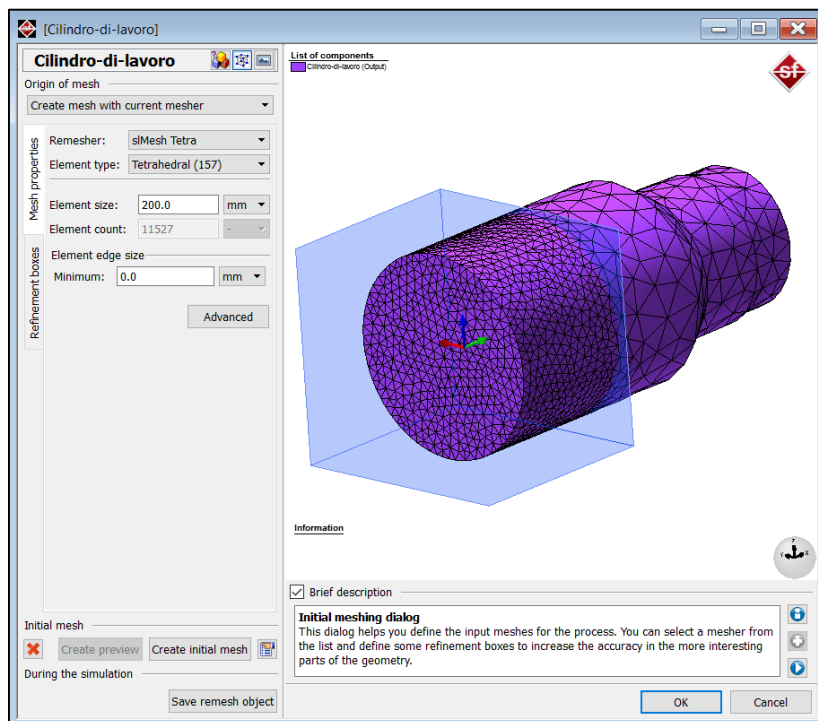


Figura 3.22 – Discretizzazione del cilindro di lavoro e refinement box

3.9.1 Descrizione degli elementi

➤ Elemento Tipo 7

Si tratta di un elemento *Brick* del primo ordine, isoparametrico ad 8 nodi, con definizione lineare del campo degli spostamenti. Ciascun nodo ai vertici ha 3 gradi di libertà, corrispondenti alle traslazioni u, v, w nello spazio.

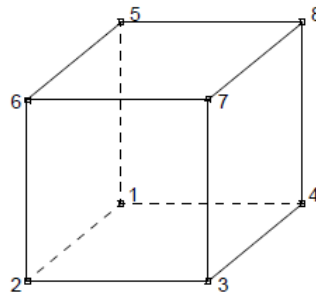


Figura 3.23 – Elemento Brick Type 7

➤ Elemento tipo 157

È un elemento tetraedrico del primo ordine, isoparametrico a 4+1 nodi, con una definizione lineare del campo degli spostamenti e formulazione di Herrmann. La distribuzione dei nodi è uno per ogni vertice del tetraedro più un nodo nel baricentro dello stesso. Ciascuno di essi ha 3 gradi di libertà corrispondenti alle tre traslazione nello spazio (u, v, w) più un ulteriore grado di libertà corrispondente alla pressione sull'elemento.

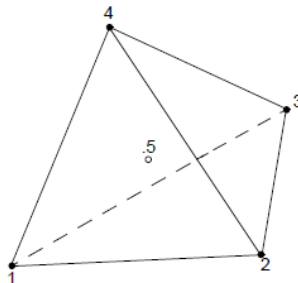


Figura 3.24 – Type 157

3.9.2 Caratteristiche dei materiali

Per quanto riguarda i materiali utilizzati nella simulazione, il software offre sia la possibilità di scegliere nella propria libreria interna che di creare manualmente un materiale inserendo tutte le caratteristiche meccaniche e termiche.

Purtroppo nella libreria del software non è disponibile alcun materiale con lo stesso codice di lega di quelli lavorati presso la Laminazione sottile e non erano disponibili dati sperimentali per poterlo creare manualmente. Si è quindi deciso di scegliere un materiale appartenente alla serie 8000, nello specifico una lega di alluminio 8090 da assegnare al laminato. Si tratta di una lega di alluminio con litio (2,5%), rame (1,5%) magnesio (1%) le cui caratteristiche sono:

<i>Caratteristiche lega 8090 [AlLi2,5Cu1,5Mg1, h2]</i>	
<i>Modulo di Young [E]</i>	77000 [MPa]
<i>Coefficiente di Poisson</i>	0,33
<i>Densità</i>	2550 [Kg/m ³]
<i>Conducibilità termica</i>	93,5 [J/(m·s·K°)]
<i>Calore specifico</i>	930 [J/(Kg·K°)]
<i>Coefficiente di espansione termica</i>	2,36·10 ⁻⁵ [1/K°]

Tabella 3.7 – Caratteristiche materiale lega 8090

Il comportamento plastico del materiale alle varie temperatura è invece descritto mediante le curve di flusso.

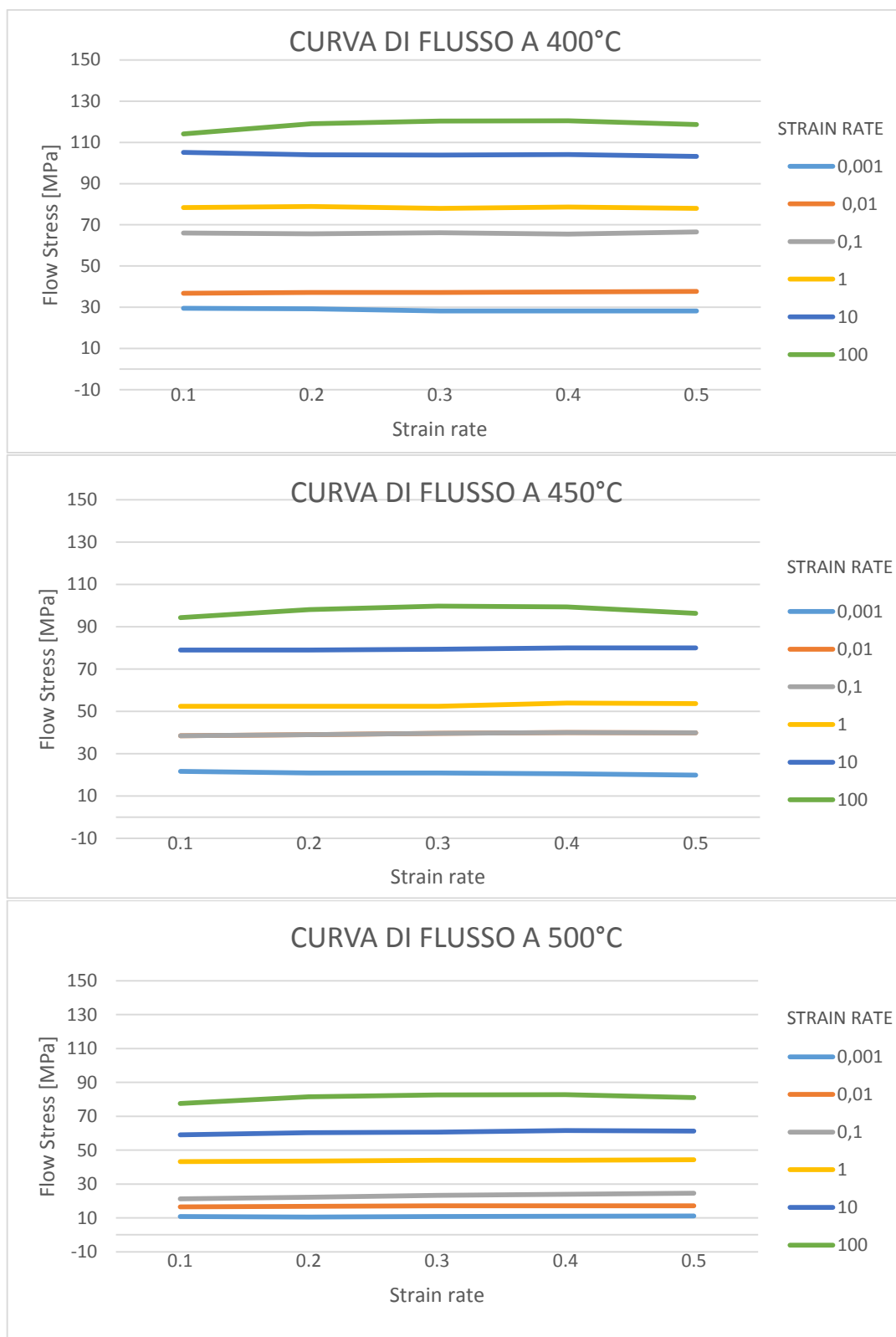


Grafico 3.1 – Curve di flusso lega 8090

Per quanto riguarda invece il cilindro di lavoro, avendo considerato l'elemento deformabile è necessario assegnargli il materiale. In questo caso è stato creato manualmente basandosi sui dati del materiale realmente utilizzato per i cilindri del laminatoio.

Inoltre non dovendo il cilindro subire alcuna plasticizzazione, il modello di comportamento è stato impostato come puramente elastico.

Le caratteristiche dell'acciaio del cilindro sono le seguenti:

Caratteristiche Acciaio Cilindri (pure elastic behavior)

<i>Modulo di Young [E]</i>	210000 [MPa]
<i>Coefficiente di Poisson</i>	0,30
<i>Densità</i>	7850 [Kg/m ³]
<i>Conducibilità termica</i>	88 [J/(m·s·K°)]
<i>Calore specifico</i>	650 [J/(Kg·K°)]
<i>Coefficiente di espansione termica</i>	1,3·10 ⁻⁵ [1/K°]

Tabella 3.8 – Caratteristiche Acciaio cilindro

3.9.3 Leggi del moto

La movimentazione dei cilindri è resa possibile mediante la definizione di una “*tabular motion*”.

Cliccando col tasto destro nell'inventario e selezionando *Press* → *Manual*, si apre un nuovo menù mediante il quale assegnare la velocità dell'elemento in funzione del tempo. Nello specifico caso dei cilindri è stato necessario assegnare la velocità angolare in determinati istanti noti.

Il tempo di laminazione è stato calcolato mediante un opportuno foglio di calcolo per ciascun passo, in base alla lunghezza della bramma, mentre la velocità è stata ricavata dai dati aziendali a disposizione.

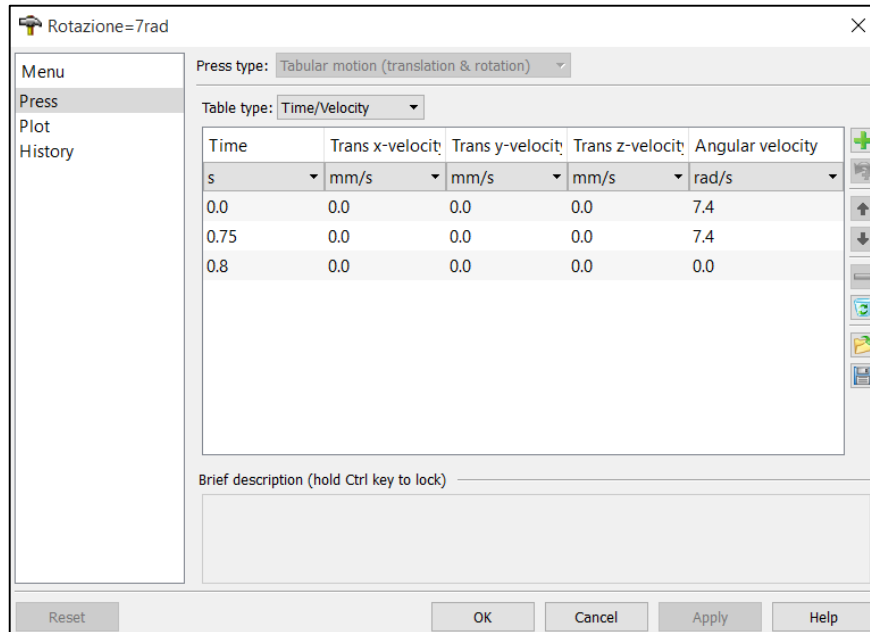


Figura 3.25 – Tabella rotazione cilindri per Passo 22

<i>n° Passo</i>	<i>Tempo di laminazione [s]</i>	<i>Velocità [rad/s]</i>
Passo 22	0,8	7,4,
Passo 23	1,4	6,1
Passo 24	2,7	5,4

Tabella 3.9 – Tempi di laminazione

Analoga operazione è stata effettuata per conferire il movimento al *pusher*, che ha il compito di spingere il laminato in ingresso ai cilindri. È stata definita una *tabular motion*, questa volta però per controllare il breve avanzamento dell'elemento è stata assegnata la velocità in funzione della corsa (*stroke*).

Per rispettare le condizioni di imbocco è stata impostata una velocità inferiore alla velocità periferica dei cilindri

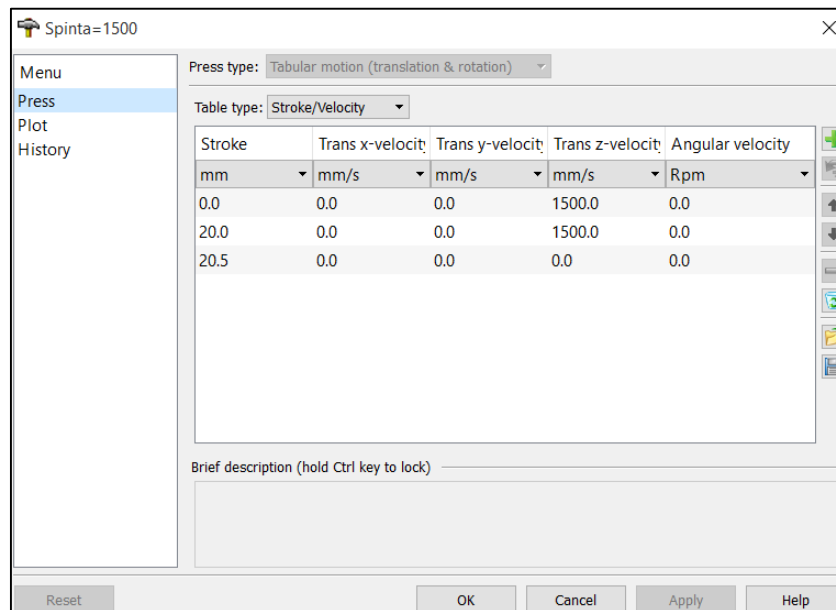


Figura 3.26 – Movimento pusher

Definite le tabelle di movimento, queste compaiono nell'inventario. Per assegnare il moto agli elementi è sufficiente trascinare l'elemento nell'albero dinamico e poi spostare le voci a cui assegnare il movimento sotto la relativa tabella "Press".

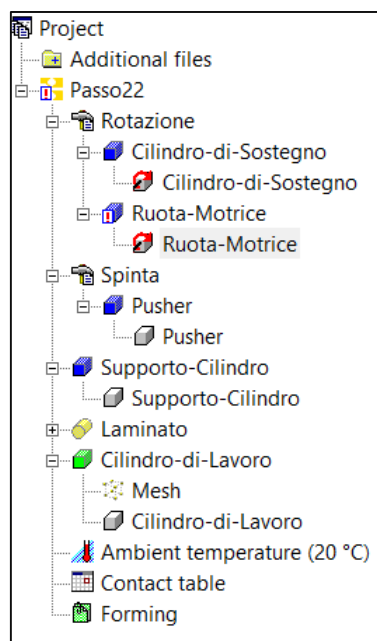


Figura 3.27 – Assegnazione movimenti

Mentre l'avanzamento lineare è stato assegnato al solo pusher, la rotazione è stata assegnata al cilindro di sostegno e alla ruota motrice.

È infatti quest'ultima che trasferisce il suo moto rotatorio al cilindro di lavoro mediante un collegamento solidale (*vedi par. 3.9.4*). Non è infatti possibile assegnare un movimento direttamente ad un elemento dotato di mesh, per questa ragione si è ricorso ad un tale espediente. Inoltre per la rotazione è necessario un passaggio ulteriore in cui definire l'asse di rotazione attorno cui avviene il movimento.

L'asse è possibile assegnarlo cliccando sulla relativa geometria col *tasto* destro ed accedendo al menù "*Rotation axis/Local system*".

3.9.4 *Tabella dei contatti*

Fondamentale per il buon esito della simulazione è la creazione della tabella dei contatti. Tale tabella permette di definire quali elementi possono interagire tra loro e che tipologie di comportamento devono assumere i corpi quando entrano in contatto. Nello specifico esistono due tipologie di contatti ammessi:

- I. **Touching:** contatto tradizionale, i corpi interagiscono tra loro senza poter compenetrarsi.
- II. **Glued:** contatto di tipo fisso, le superfici una volta entrate in contatto non possono separarsi.

I contatti devono essere specificati solo per i corpi deformabili, quindi per il laminato e per il cilindro di lavoro:

	Cilindro di lavoro	Cilindro di sostegno	Laminato	Pusher	Ruota motrice	Supporto cilindro	Piano di simmetria orizzontale	Pano di simmetria verticale
Laminato	T	-	T	-	-	-	T	T
Cilindro di Lavoro	-	T	-	T	G	T	-	T

Tabella 3.10 – Tabella dei contatti

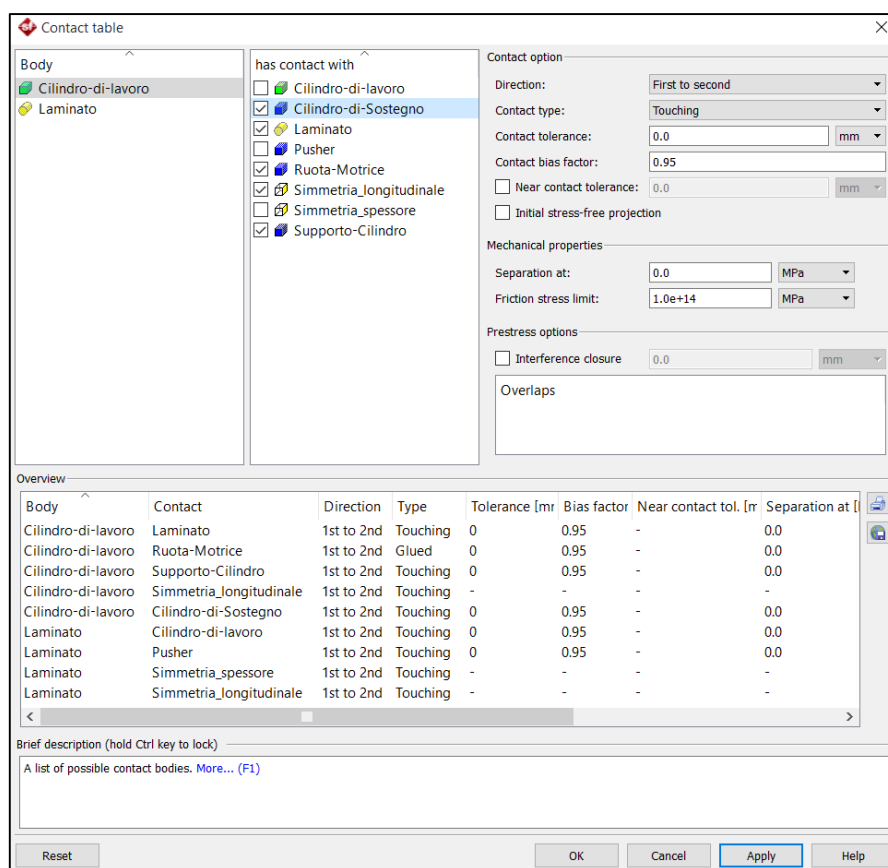


Figura 3.28 – Finestra della contact table di Simufact forming

3.9.5 Attrito

L'attrito è un fenomeno fondamentale nel processo di laminazione a caldo, esso premette il trascinamento del laminato tra i cilindri ed influenza il fenomeno deformativo.

Ad oggi una formulazione analitica esatta che permetta di quantificare con precisione il fenomeno dell'attrito non esiste. Esistono però diversi modelli empirici e semi-analitici applicabili a seconda del caso specifico in analisi.

In particolare per la laminazione a caldo sono stati messi appunto dei modelli empirici sviluppate sulle esperienze di *Ekelund* e *Siebel*. Tali modelli prevedono che l'attrito durante la laminazione a caldo sia influenzata da diversi fattori tra i quali:

- a. Temperatura del laminato
- b. Velocità di laminazione
- c. Dal tipo di materiale
- d. Dal grado di finitura dei cilindri
- e. Presenza di lubrificazione

In linea di massima si può dire che il coefficiente di attrito tra cilindro e laminato, aumenti all'aumentare della temperatura e si abbassi all'aumentare della velocità di laminazione.

Non essendo disponibili dati aziendali per il coefficiente di attrito si è ricorso allo studio della letteratura scientifica esistente, da cui si è evidenziato che il valore del coefficiente di attrito tra acciaio e alluminio, nel caso di laminazione a caldo, si attesta tra 0,4 - 0,6, mentre tra acciaio-acciaio il valore è più basso, compreso tra 0,1 - 0,3.

Il software permette di scegliere tra diverse leggi di attrito per la modellazione del fenomeno. Nel caso specifico si è scelto di utilizzare la formulazione classica di

Coulomb, impostando un valore costante di attrito pari a $\mu=0,5$, per l'attrito tra laminato e cilindro di lavoro, e $\mu=0,2$ tra cilindro di lavoro e di sostegno.

La formulazione di Coulomb prevede che non vi sia slittamento tra i corpi in contatto finché il valore dello sforzo di taglio dovuto all'attrito non raggiunge il valore limite.

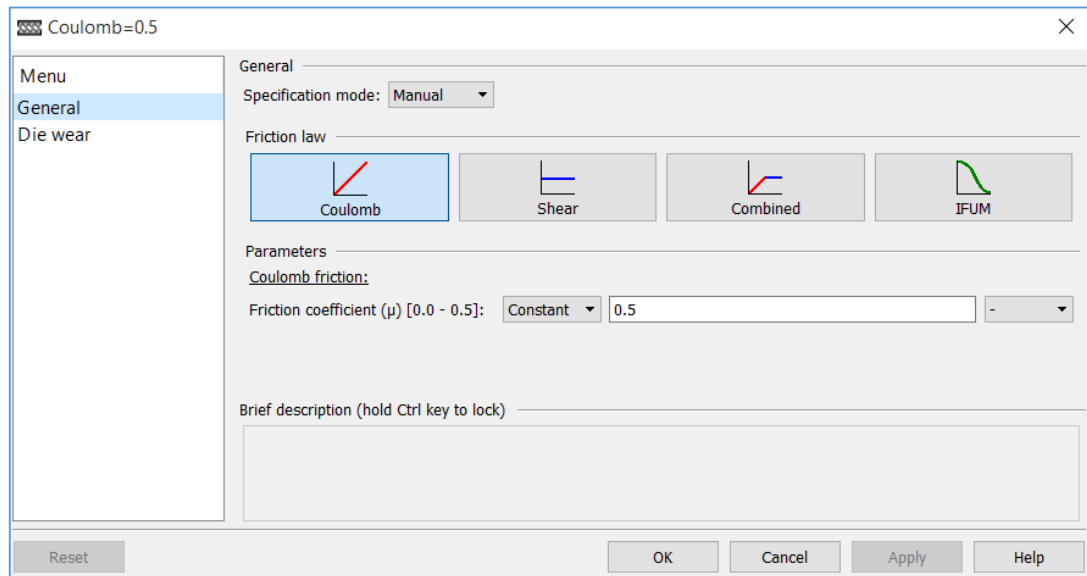


Figura 3.29 – Definizione della legge di attrito in Simufact forming.

Una volta definito il modello di attrito, la corrispondente proprietà è stata assegnata agli elementi dell'albero dinamico.

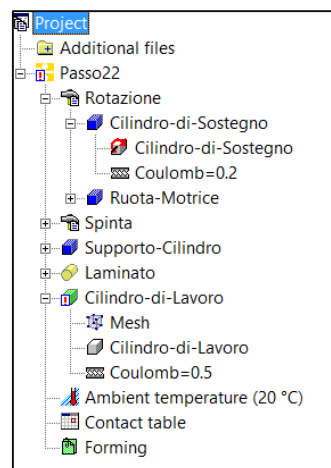


Figura 3.30 – Dettaglio dell'albero dinamico

3.9.6 Attributi termici

Per ciascun elemento del modello FEM è stato necessario definire le proprietà termiche, quali:

- ✓ Temperatura iniziale del pezzo,
- ✓ Coefficiente di dissipazione verso l'ambiente.
- ✓ Fattore di emissività.
- ✓ Coefficiente di dissipazione verso il laminato (*solo per i Dies*)

La temperatura dell'ambiente è stata fissata in fase di definizione dell' upsetting dell'analisi pari a 20°C (*vedi par. 3.7*).

Per quanto concerne il laminato, per definire il corretto valore di temperatura iniziale a ciascun passo simulato, è stato effettuato un campionamento su 50 nastri 8009, rilevando tramite IBA il valore di temperatura in ingresso misurato dal pirometro, e successivamente ricavato il valore medio per ogni passo.

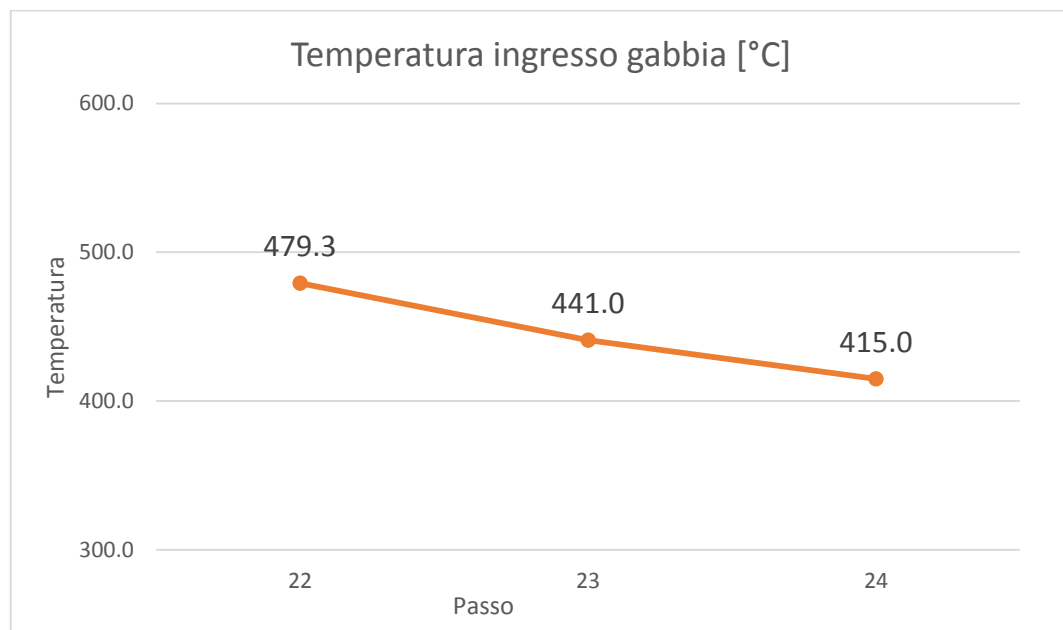


Grafico 3.2 – Temperatura media del laminato in ingresso alla gabbia di laminazione.

Per il coefficiente di dissipazione e il fattore di emissività, si è invece fatto riferimento ai dati utilizzati dal software *Achembach* di gestione del laminatoio.

Attributi termici Laminato

Temperatura iniziale	P22: 480°C; P23: 440°C; P24: 415°C
Coefficiente di dissipazione verso l'ambiente	50 W/(m ² ·K)
Emissività	0,8

Tabella 3.11 – Attributi termici del laminato

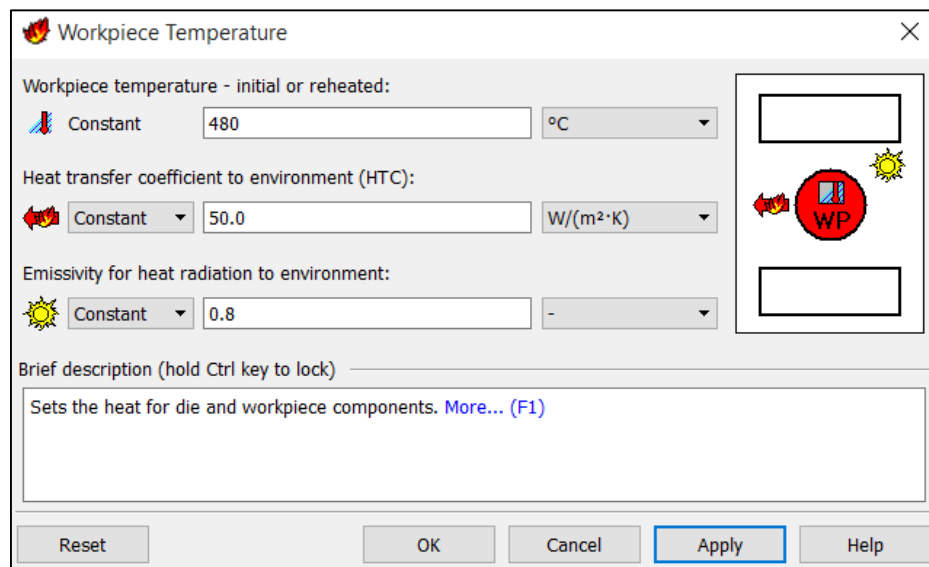


Figura 3.31 – Finestra di definizione degli attributi termici

Per il cilindro di lavoro non essendo disponibile un profilo di temperatura sperimentale, è stata impostata una temperatura iniziale uniforme pari a 50°C, ossia corrispondente alla temperatura del liquido refrigerante che investe il cilindro. Come accennato in apertura del capitolo, è stato trascurato il riscaldamento derivante dai precedenti passi di laminazione. Per tutti gli altri parametri, analogamente a quanto fatto per il laminato, sono stati presi in considerazione i valori utilizzati dal software di gestione del laminatoio.

Attributi termici Cilindro di Lavoro

Temperatura iniziale	50°C
Coefficiente di dissipazione verso l'ambiente	33 W/(m ² ·K)
Coefficiente di dissipazione verso il laminato	20000 W/(m ² ·K)
Emissività	0,25

Tabella 3.12 – Attributi termici del cilindro di lavoro

Die Temperature

Initial die temperature:
 °C

Heat transfer coefficient to environment (HTC):
 W/(m²·K)

Heat transfer coefficient to workpiece:
 W/(m²·K)

Emissivity for heat radiation to environment:
 -

Brief description (hold Ctrl key to lock)
 Choose whether you want to specify a constant value or a table as emissivity for heat radiation to environment. You can also choose to have a table selected for you based on the material being used by selecting 'Automatic'.

Reset OK Cancel Apply Help

The schematic diagram on the right shows a red rectangular block labeled 'Die' with a blue arrow pointing down to a circular block labeled 'WP' (Workpiece). A yellow sun icon is positioned above the 'Die' block.

Figura 3.32 – Finestra di definizione degli attributi termici per i “dies”

3.10 Parametri di simulazione

Una volta definita la struttura del modello per ciascun passo è necessario impostare i parametri della simulazione. Per modificare le impostazioni è necessario accedere nel menù *forming* nell'albero dinamico di ciascun passo di laminazione (vedi Figura 3.30). Particolarmente importante per il buon esito della simulazione è la definizione del *time Step*.

3.10.1 Time step

Per *time step* si intende l'intervallo di tempo passato il quale il solutore deve ricalcolare la configurazione attuale della struttura e riapplicare i carichi per risolvere le equazioni di equilibrio.

L'algoritmo del solutore sf Marc, infatti, prevede che il processo sia studiato in maniera incrementale, dividendo la durata complessiva del fenomeno in un numero elevato di *step* caratterizzati da incrementi della variabile tempo Δt .

All'inizio di ciascun incremento (tempo t) è nota la posizione iniziale dei punti nodali mediante le relative coordinate x_t, y_t, z_t . Il solutore ritiene fissa tale configurazione per tutta la durata del time step ed esegue il calcolo, ottenendo come risultato le posizioni dei punti all'istante $t + \Delta t$, ossia $x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t}, z_{t+\Delta t}$.

Tale approccio alla risoluzione del problema è definito **solid formulation**.

Da quanto detto si capisce come un valore di time step troppo grande, rende l'analisi numerica poco precisa e soggetta a grosse approssimazioni, in casi estremi può anche provocare l'arresto del calcolo poiché il solutore non è in grado di risolvere le equazioni, o l'errore risultante è troppo elevato. Allo stesso tempo un time step eccessivamente piccolo, allunga enormemente i tempi di calcolo, ed anche in questo caso può verificarsi l'arresto dell'analisi.

Si comprende quindi la delicatezza della scelta di tale parametro che non può che basarsi sulla sensibilità ed esperienza dell'utente nell'utilizzo del software.

L'approccio utilizzato è quello di definire un valore di primo tentativo ed eventualmente correggerlo in base all'esito della simulazione.

Nel caso specifico si è scelto di ottenere un time step di circa 0,005 s, ossia 5 millesimi di secondo. Per fare ciò sono stati variati il numero di step per ogni passo in funzione della durata.

	<i>Tempo di processo [s]</i>	<i>N° Step</i>	<i>Time Step [s]</i>
<i>Passo 22</i>	<i>0,8</i>	<i>150</i>	<i>0,0053</i>
<i>Passo 23</i>	<i>1,4</i>	<i>250</i>	<i>0,0056</i>
<i>Passo 24</i>	<i>2,7</i>	<i>550</i>	<i>0,0049</i>

Tabella 3.13 – Time step per ciascun passo

3.10.2 Stage control

Per studiare la deformazione subita dal laminato a seguito dei tre passi di laminazione, è necessario che il laminato in uscita dal primo passo sia utilizzato come input per il passo successivo, e così via. Il software deve quindi conservare la configurazione deformata in uscita e importarla per il passo successivo. Ciò è possibile tramite la definizione di uno *stage control*.

Tale funzione del software permette di collegare processi multipli in una unica sequenza *multistages*. Così facendo il software avvia in sequenza la simulazione del passo successivo al termine del precedente, importando i risultati richiesti e utilizzandoli come condizioni iniziali del passo attuale.

Tramite un apposito menù è possibile scegliere quali risultati importare dal passo precedente, come si nota dalla figura sottostante, nel caso specifico è stata selezionata l'importazione dei risultati del solo laminato.

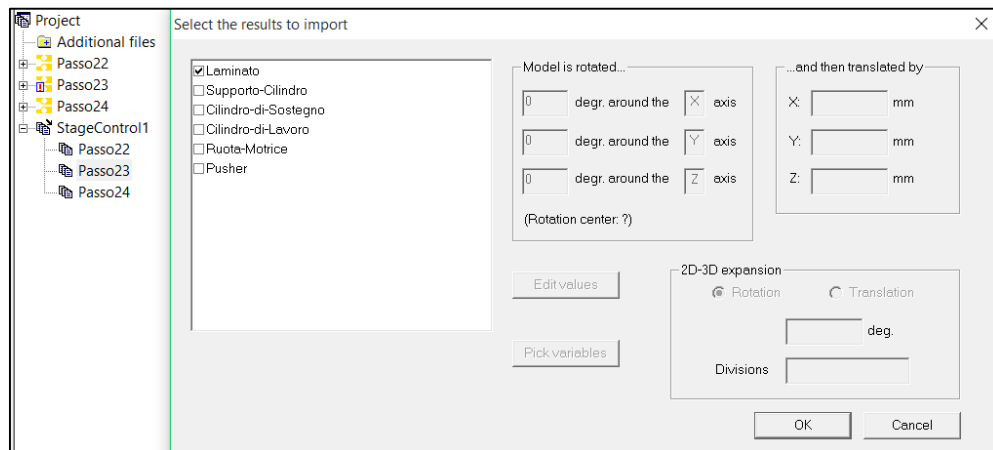


Figura 3.33 – Stage control

3.10.3 Particelle di controllo

Per poter misurare il profilo di Crown del laminato al termine di ciascun passo di laminazione è stato necessario definire delle particelle di controllo. Tali particelle consistono in particolari punti in cui una serie di parametri come la temperatura, la pressione, o anche solo la posizione nello spazio, possono essere monitorati nel tempo.

L'evoluzione nel tempo di tali punti possono essere esportati tramite file .csv, al termine della simulazione, ed elaborati mediante un foglio di calcolo.

Per i primi due passi simulati (22° e 23°), sono stati definiti 4 sezioni di campionamento, ad una distanza proporzionale alla lunghezza totale del laminato e rispettivamente ogni 300 e 500mm di distanza, con una spaziatura trasversale dai punti di 100mm.

Per il 24° passo, per ricavare un profilo di Crown sufficientemente dettagliato, sono stati definiti dei piani di campionamento ogni 300 mm nella direzione di laminazione (asse z) con una spaziatura ogni 100mm nel senso della larghezza (direzione x), in modo tale da avere almeno 5 punti di campionamento per ciascuno dei 12 piani.

È importante sottolineare che a seguito del processo deformativo, e del conseguente aumento delle dimensioni longitudinali e trasversali, le distanze reali tra i piani di campionamento risultano maggiori rispetto a quelle qui definite.

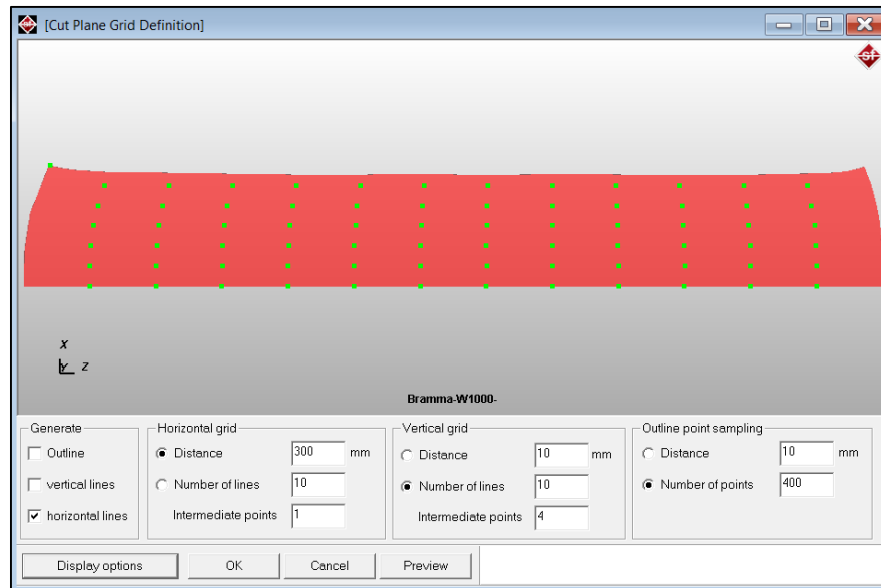


Figura 3.34 – Definizione delle particelle di controllo per il passo 24

Terminata la costruzione del modello è stata infine avviata l'analisi tramite l'apposita finestra di dialogo.

3.11 Risultati dell'analisi numerica

I dati delle particelle con le coordinate dei punti superficiali del laminato sono stati elaborati mediante un opportuno foglio di calcolo per ricavare un profilo di spessore e calcolare il Crown per ogni passo.

Sono state prese le coordinate dei punti superficiali al termine del processo deformativo, corrispondente all'ultimo step di simulazione di ciascun passo. In particolare la coordinata y, delle particelle fornisce di volta in volta la quota della superficie del laminato e di conseguenza il valore dello spessore in quel specifico punto considerato.

	A	B	C	D	G	I	K	L	M	N	O
1	Increment	Time [s]	Stroke [mm]	PointID	Coord X	Coord Y	Coord Z	Coord Z Arrow	Effective plastic strain [-]	Temperature [°C]	Effective stress [MPa]
2	150	0,8	0,00148461	0	0	0,00	1945,94	1900	0,620489	492,076	14,1011
3	150	0,8	0,00148461	1	0	0,49	1945,94	1900	0,621357	492,033	13,1965
4	150	0,8	0,00148461	2	0	0,98	1945,95	1900	0,622224	491,99	12,2916
5	150	0,8	0,00148461	3	0	1,47	1945,96	1900	0,623091	491,947	11,3864
6	150	0,8	0,00148461	4	0	1,96	1945,97	1900	0,623959	491,904	10,4808
7	150	0,8	0,00148461	5	0	2,45	1945,98	1900	0,624827	491,861	9,57482
8	150	0,8	0,00148461	6	0	2,95	1945,99	1900	0,625694	491,818	8,66852
9	150	0,8	0,00148461	7	0	3,44	1946	1900	0,626761	491,761	9,43987
10	150	0,8	0,00148461	8	0	3,93	1946,04	1900	0,628662	491,649	8,93048
11	150	0,8	0,00148461	9	0	4,42	1946,09	1900	0,63056	491,536	8,42228
12	150	0,8	0,00148461	10	0	4,91	1946,13	1900	0,63246	491,423	7,91482
13	150	0,8	0,00148461	11	0	5,40	1946,18	1900	0,634361	491,31	7,40809
14	150	0,8	0,00148461	12	0	5,89	1946,23	1900	0,636264	491,197	6,9021
15	150	0,8	0,00148461	13	0	6,38	1946,27	1900	0,638168	491,084	6,39685
16	150	0,8	0,00148461	14	0	6,87	1946,32	1900	0,639926	490,951	6,50077
17	150	0,8	0,00148461	15	0	7,35	1946,41	1900	0,641439	490,789	7,71129
18	150	0,8	0,00148461	16	0	7,83	1946,49	1900	0,642935	490,63	8,90746
19	150	0,8	0,00148461	17	0	8,30	1946,58	1900	0,644433	490,47	10,1045
20	150	0,8	0,00148461	18	0	8,77	1946,66	1900	0,645934	490,309	11,3025
21	150	0,8	0,00148461	19	0	9,25	1946,75	1900	0,647437	490,149	12,5014
22	150	0,8	0,00148461	20	0	9,72	1946,83	1900	0,648942	489,988	13,7012
23	150	0,8	0,00148461	21	0	10,03	1946,92	1900	0,6499	489,886	14,4645
24	150	0,8	0,00148461	22	0	10,03	1946,95	1900	0,649899	489,886	14,4641
25	150	0,8	0,00148461	23	0	0,00	1461,58	1500	0,648066	491,294	13,1401
26	150	0,8	0,00148461	24	0	0,47	1461,61	1500	0,648975	491,156	12,2298
27	150	0,8	0,00148461	25	0	0,93	1461,63	1500	0,649885	491,018	11,3188
28	150	0,8	0,00148461	26	0	1,40	1461,66	1500	0,650794	490,88	10,407
29	150	0,8	0,00148461	27	0	1,86	1461,69	1500	0,651704	490,741	9,49446
30	150	0,8	0,00148461	28	0	2,32	1461,71	1500	0,652613	490,603	8,58115

Figura 3.35 –Dati particelle

Nelle figure sottostante sono riportati i valori campionati ed infine il profilo medio deviato con il valore di crown calcolato. Avendo sviluppato un modello simmetrico, i valori letti sono da intendersi dimezzati rispetto alle dimensioni reali. Inoltre per offrire una migliore visualizzazione e ricavare un profilo completo di spessore nel senso della larghezza del laminato, i valori sono stati ribaltati specularmente rispetto all'asse di simmetria.

I. Passo 22

Semi-spessore di target del passo: 9,5 mm

Valore di Crown calcolato: **1,18**

Sezione	Larghezza laminato					
	-500	-400	-300	-200	-100	0
1 500mm	9,62	9,44	9,48	9,61	9,4	9,57
2 1000mm	9,77	9,77	9,81	10	9,98	10
3 1500mm	9,62	9,66	9,67	9,67	9,83	9,95
4 2000mm	9,66	9,72	9,87	9,89	9,98	10,03

Tabella 3.14 – Campionamento spessori passo 22

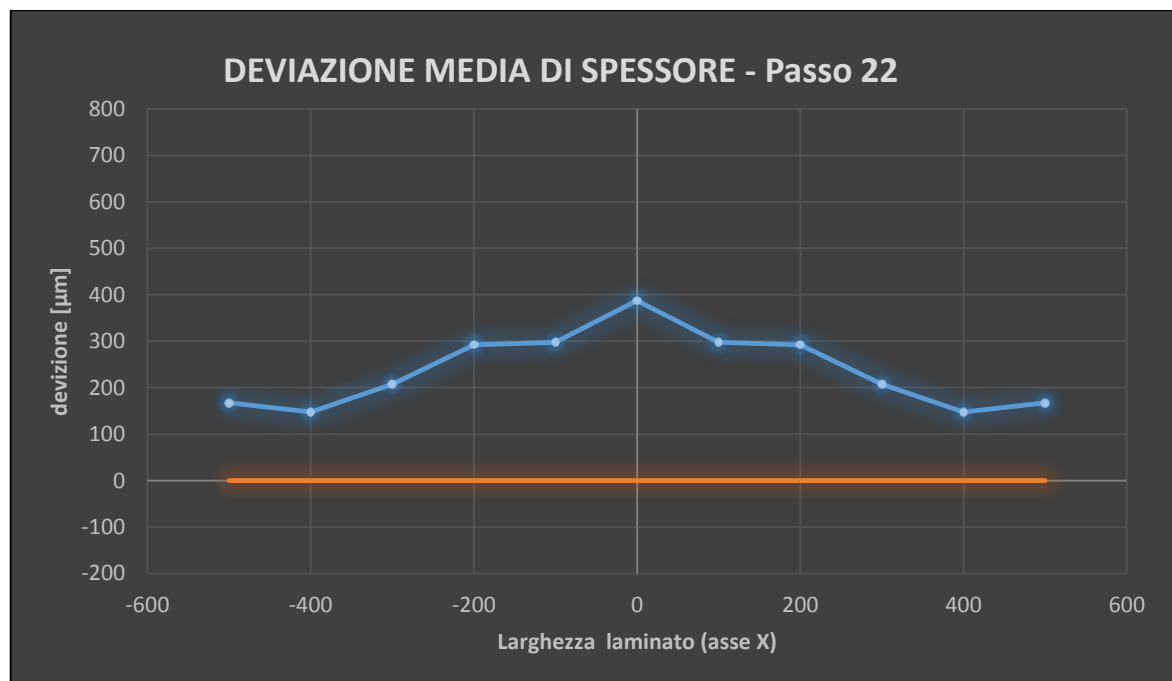


Grafico 3.3 – Deviazione di spessore Passo 22

II. Passo 23

Semi-spessore di target del passo: 5,5mm

Valore di Crown calcolato: **3,09**

Sezione	Larghezza laminato					
	-500	-400	-300	-200	-100	0
1 800mm	5,61	5,46	5,91	6,03	5,97	5,96
2 1600mm	5,43	5,69	5,74	5,79	5,79	5,77
3 2400mm	5,43	5,48	5,75	5,89	5,97	5,95
4 3200mm	5,59	5,75	5,85	5,91	5,93	5,95

Tabella 3.15 – Campionamento spessori passo 23

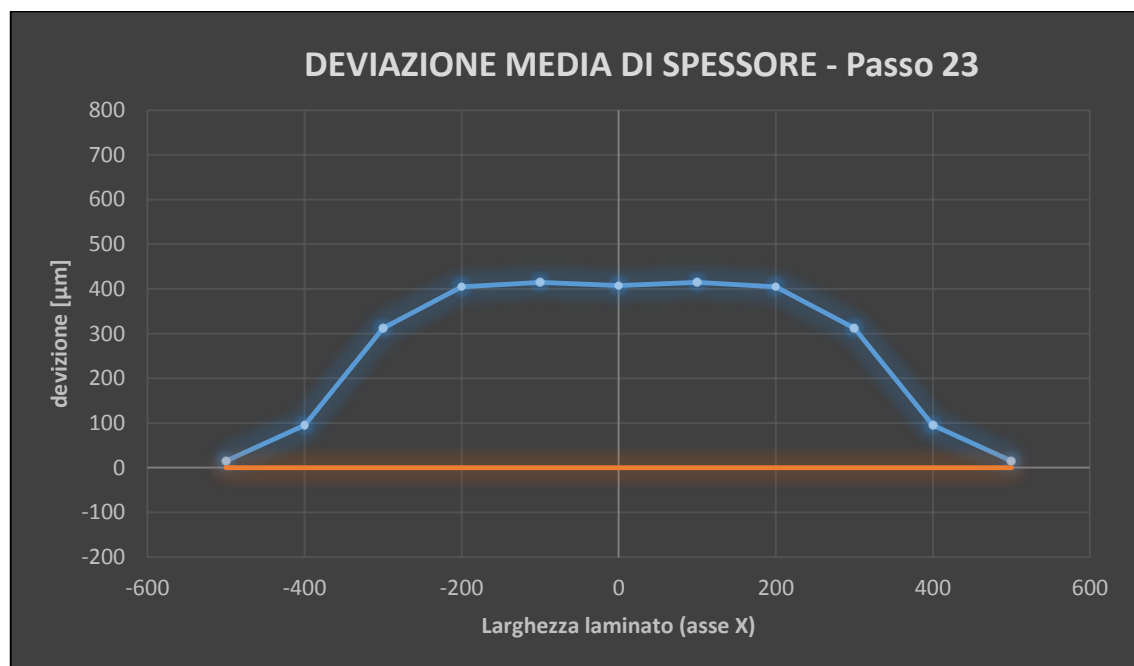


Grafico 3.4 – Deviazione di spessore Passo 23

III. Passo 24

Semi-spessore di target del passo: 3mm

Valore di Crown calcolato: **0,16**

Sezione	Asse x					
	-500	-400	-300	-200	-100	0
1 400mm	4,55	4,5	4,65	4,7	4,77	4,7
2 800mm	4,45	4,69	4,66	4,83	4,82	4,41
3 1200mm	4,43	5,01	4,86	5,08	4,74	4,3
4 1600mm	4,35	4,79	4,93	4,87	5,02	4,49
5 1900mm	4,16	4,56	4,73	4,71	4,76	4,55
6 2300mm	4,11	4,21	4,47	4,54	4,45	4,18
7 2700mm	4,26	4,52	4,59	4,58	4,65	4,52
8 3000mm	4,31	4,3	4,58	4,6	4,66	4,32
9 3400mm	4,41	4,67	4,71	4,65	4,91	4,4
10 3800mm	4,4	4,42	4,68	4,62	4,71	4,51
11 4200mm	4,5	4,67	4,64	4,7	4,71	4,48
12 4600mm	4,2	4,16	4,48	4,5	4,76	4,63

Tabella 3.16 – Campionamento spessori passo 24

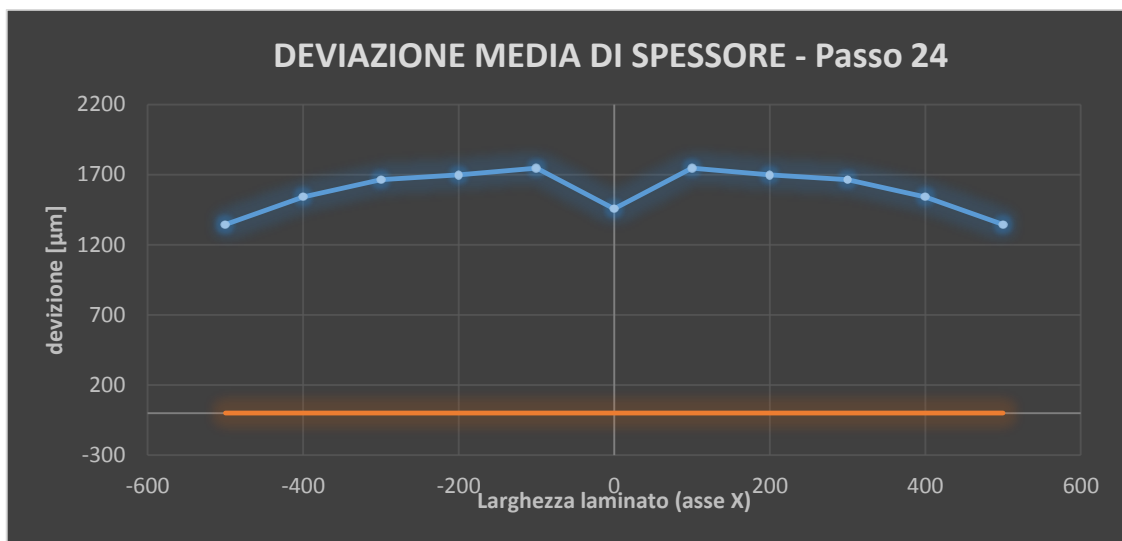


Grafico 3.5 – Deviazione di spessore Passo 24

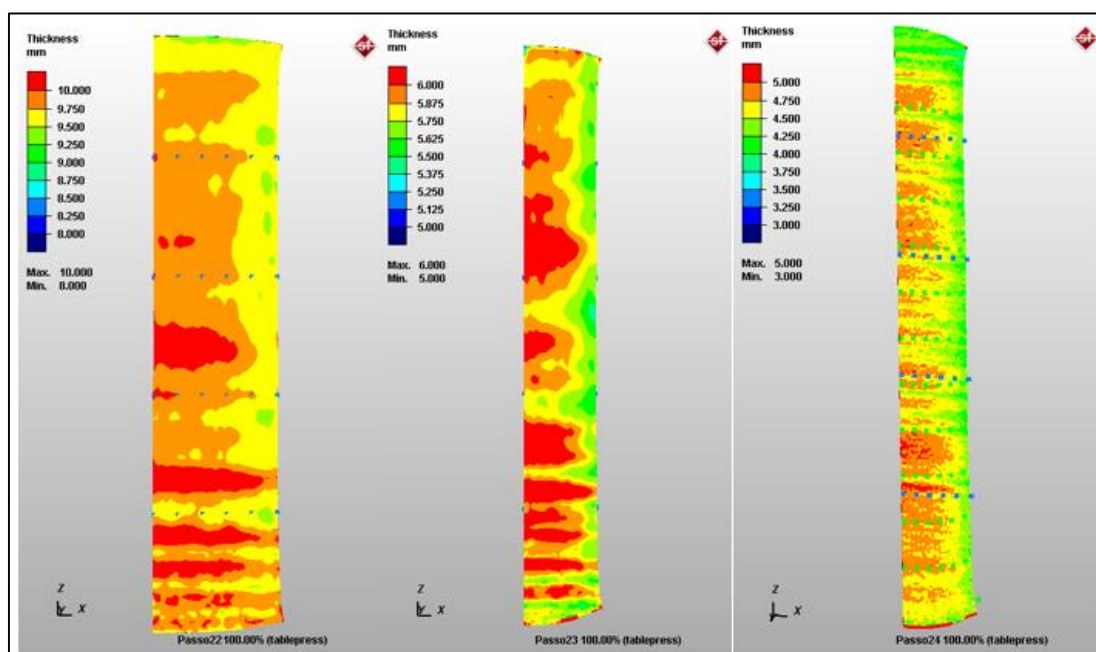


Figura 3.36 – Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24

3.12 Modello Comparativo in Marc/Mentat

A valle del postprocessamento dell' analisi realizzata in SIMUFACT è stato costruito un nuovo modello utilizzando i software Mentat2014, per il pre e post processamento ed il solutore Marc 2014 sempre della MSC.

I software MARC/MENTAT non sono dedicati ai processi di laminazione ma consentono di coprire un campo più vasto di Fenomeni Ingegneristici lasciando così più libertà di azione nella modellazione degli stessi.

Di seguito è illustrato il modello realizzato.

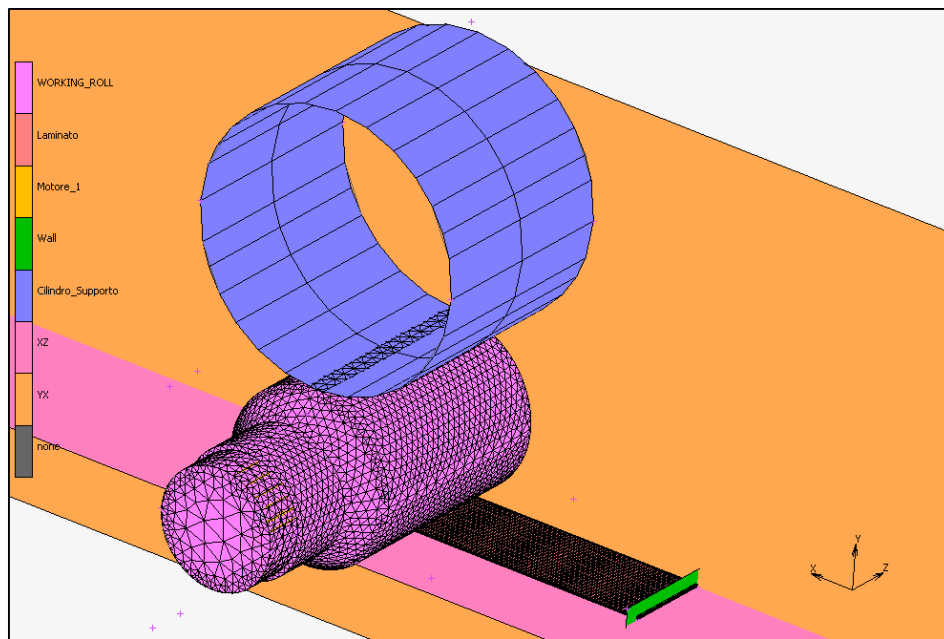


Figura 3.37 – Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24

3.12.1 Caratteristiche Modello

Le Ipotesi considerate sono riportate nel paragrafo 3.3, anche per il nuovo modello è stata considerata la bombatura termica del cilindro oltre alla flessione meccanica dello stesso.

Anche in questo caso è stata effettuata un'analisi di tipo Non lineare Termomeccanica Accoppiata avendo considerato i fenomeni termici in gioco, accoppiati a quelli meccanici.

Per i passi simulati e la scheda di simulazione si fa riferimento al paragrafo 3.5.

In particolare è stato simulato il passo 22 per avere un rapido confronto con il primo modello.

Le condizioni di simmetria e le caratteristiche Geometriche dei componenti del modello realizzato sono riportate nei paragrafi 3.6 e 3.8.

Per la Discretizzazione del Cilindro di Lavoro (Working Roll) e del laminato sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- WORKING ROLL:
 - N. Elementi: 23104
 - Elemento: Tetra 4
 - Elm Size: 50
 - Coarsening Factor 1.5
 - Coordal deviation 0.01

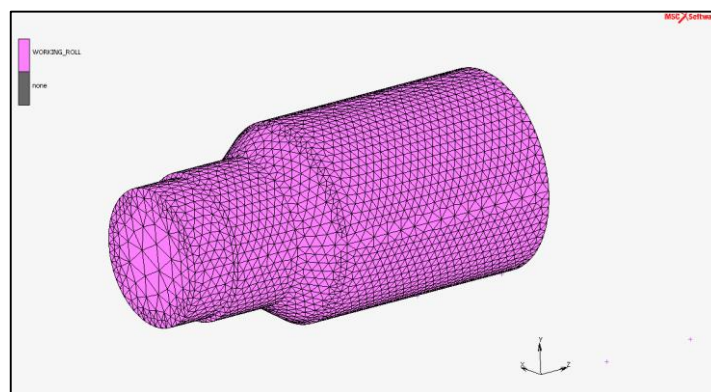


Figura 3.38 – Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24

- LAMINATO:

- N. Elementi: 24000
- Elemento: Hex8
- Elm Size: 10mm in X 4mm in Y 12.5mm in Z

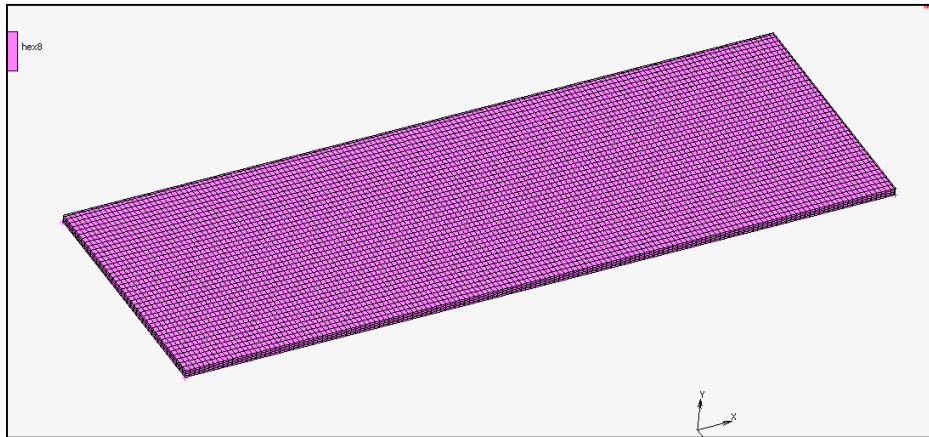


Figura 3.39– Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24

- CILINDRO DI SUPPORTO:

Il Cilindro di Supporto è stato modellato con una superficie cilindrica.

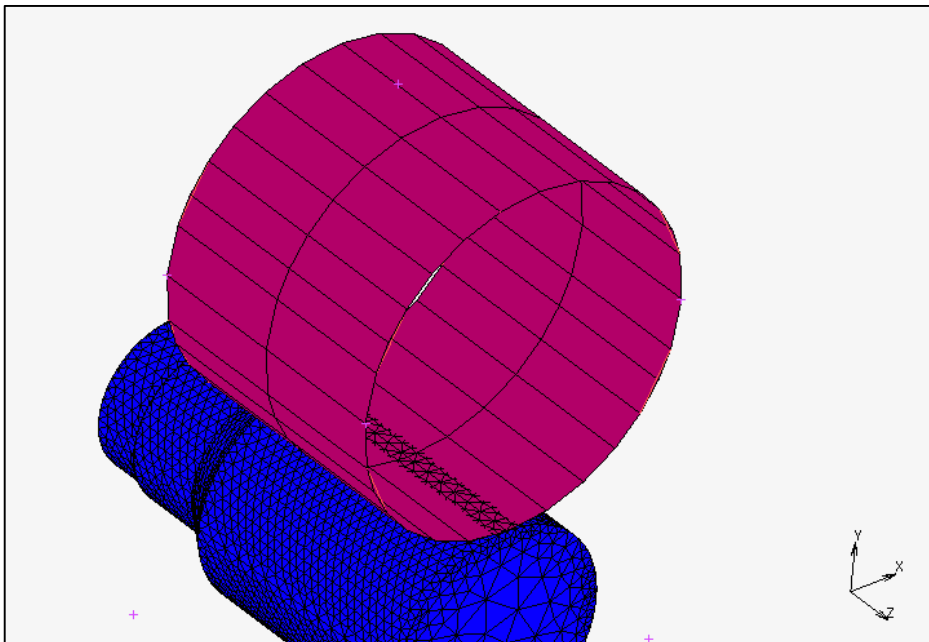


Figura 3.40– Plottaggio Spessore laminato nei passi 22,23 e 24

- MOTORE:

Il Motore del Cilindro di Lavoro, stato modellato con una superficie cilindrica a contatto con l'estremità del Cilindro stesso.

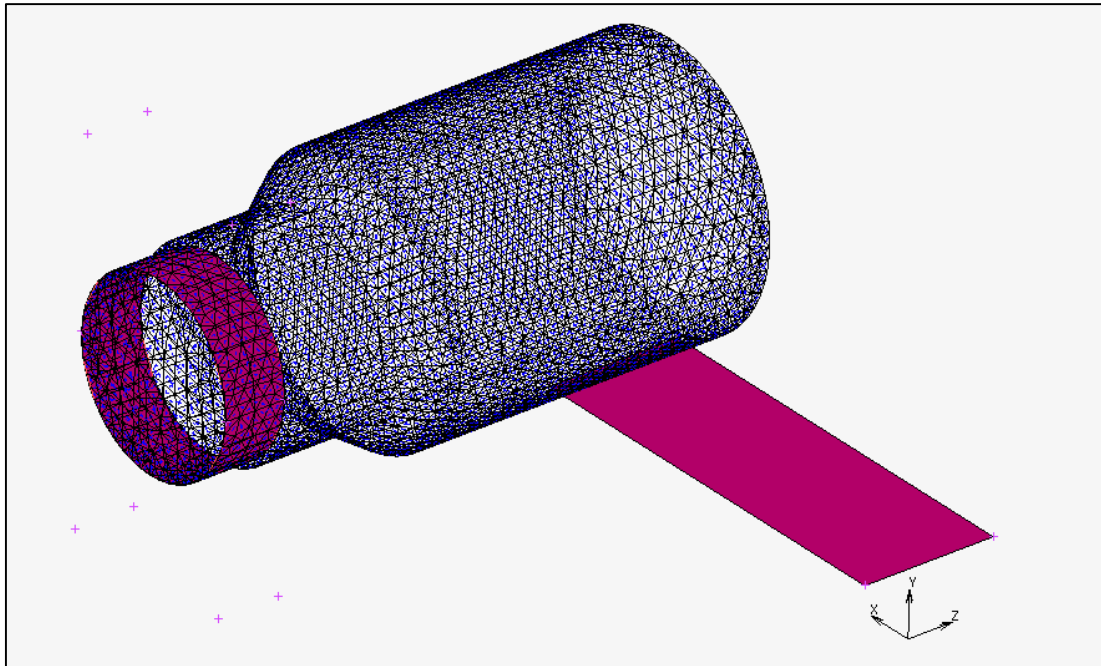


Figura 3.41– Motore

I materiali utilizzati, le leggi del moto, l'attrito e le caratteristiche termiche considerate sono riportati, rispettivamente, nei paragrafi 3.9.2, 3.9.3, 3.9.5, 3.9.6.

3.12.2 Contatti

I contatti sono stati definiti secondo la seguente tabella:

Name:

View Mode:

Entry Matrix

Entries

☐ Show Visible Bodies Only

First		Body Name	Body Type	Second						
				1	2	3	4	5	6	7
1		WORKING_ROLL	Meshed (Deformable)		T	G		T		T
2		Laminato	Meshed (Deformable)				T		T	T
3		Motore_1	Geometric							
4		Wall	Geometric							
5		Cilindro_Supporto	Geometric							
6		XZ	Symmetry							
7		YX	Symmetry							

Shown Entries

Activate

Deactivate

Remove

Detection

Remove Inactive

Add/Replace Entries

Full Default Contact

Touching

Glued

OK

Figura 3.42– Contatti

In particolare il Cilindro di lavoro ed il Laminato hanno il Parametro Boundary Description settato su Analytical

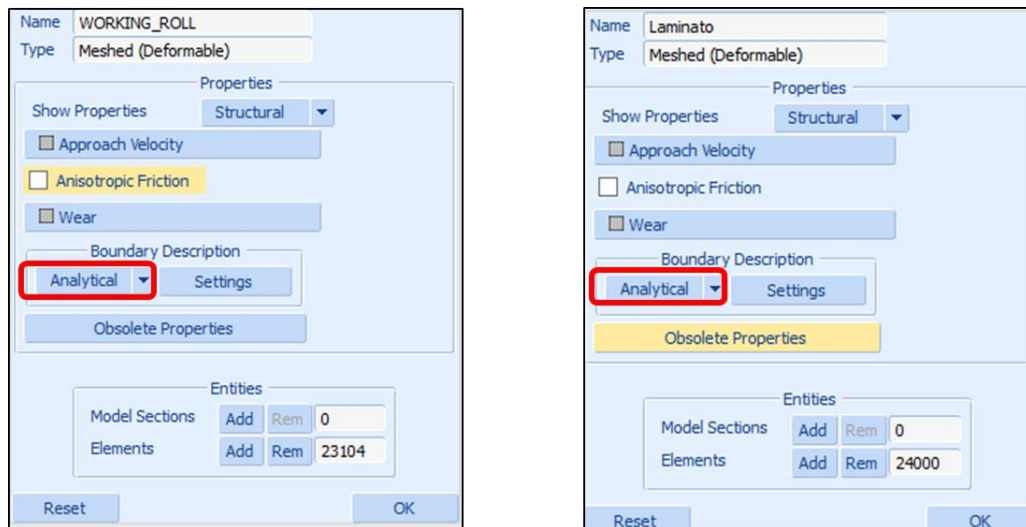


Figura 3.43– Proprietà dei corpi di contatto

La suddetta proprietà consente una migliore risoluzione dei contatti soprattutto in presenza di geometrie curvilinee e cilindriche, poiché le geometrie sono rappresentate con una funzione analitica continua.

In particolare per gli elementi 3D sono definite superfici coniche locali attraverso i segmenti delle superfici adiacenti. I nodi dei corpi in contatto toccano le entità analitiche al posto degli elementi finiti effettivi. Le entità analitiche vengono aggiornate seguendo la deformazione dei corpi.

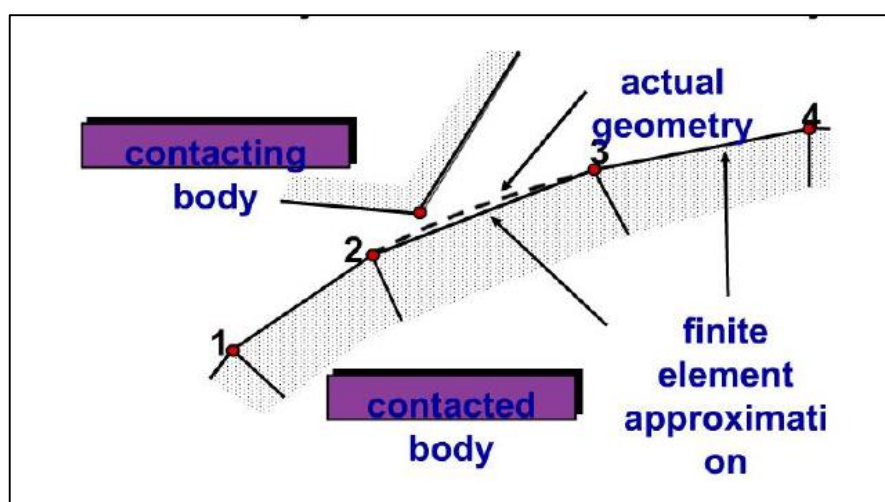


Figura 3.44– Proprietà dei corpi di contatto

Il metodo di contatto utilizzato è il Segment To Segment.

Figura 3.45– Metodo di Contatto

3.12.3 Parametri di Processamento

Il numero di Incrementi è di 298 mentre il Total Time è pari a 1.

Figura 3.46– Adaptive Multicriteria Parameters

3.12.4 Risultati

La figura seguente mostra la deformazione lungo Y del laminato.

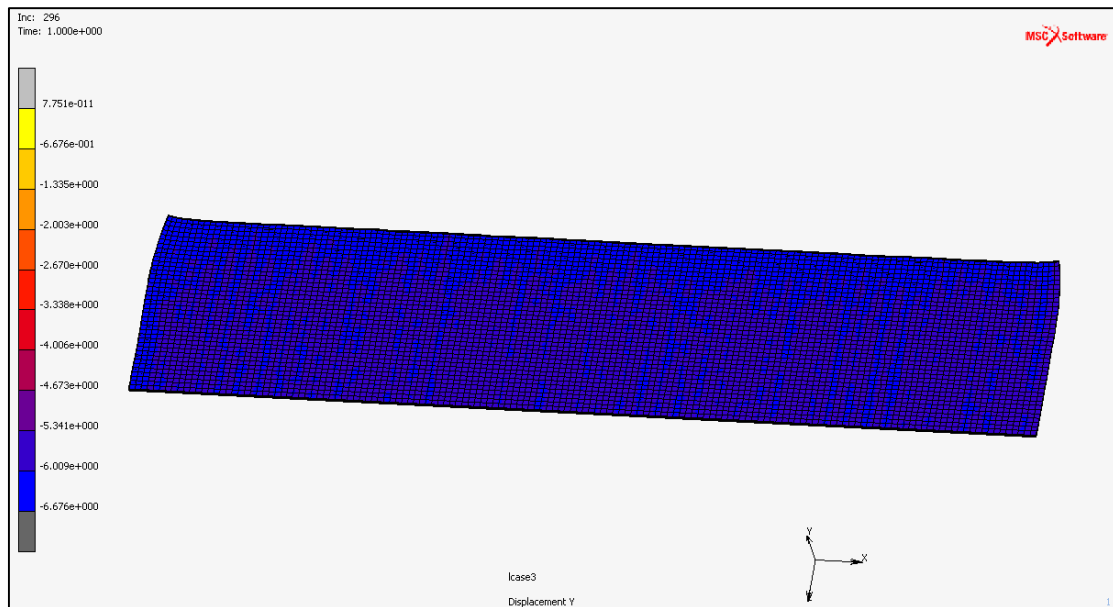


Figura 3.47– Displacement lungo Y

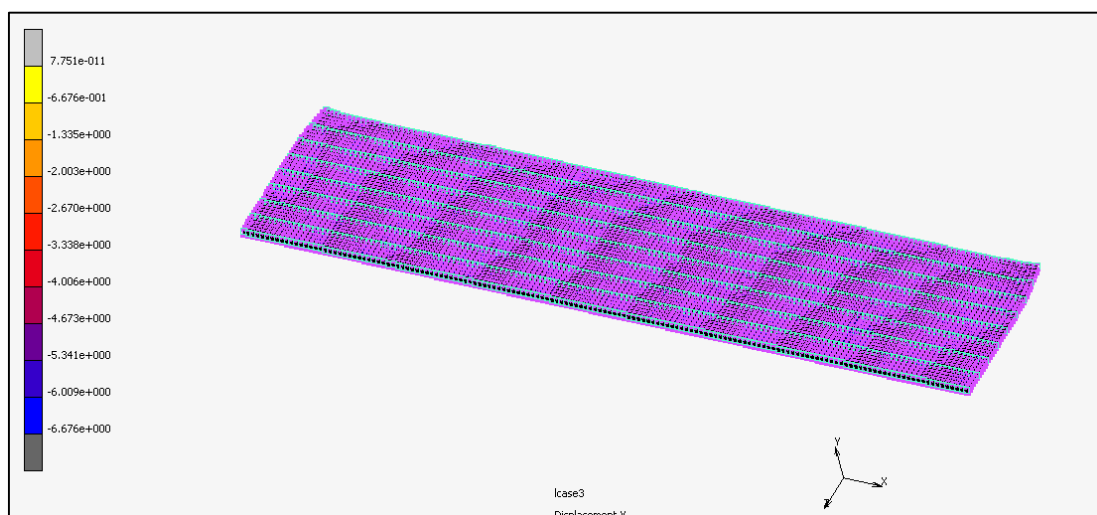


Figura 3.48–Nodi per rilevazione spessore

Di seguito è mostrato il profilo creato con gli spessori medi del laminato:

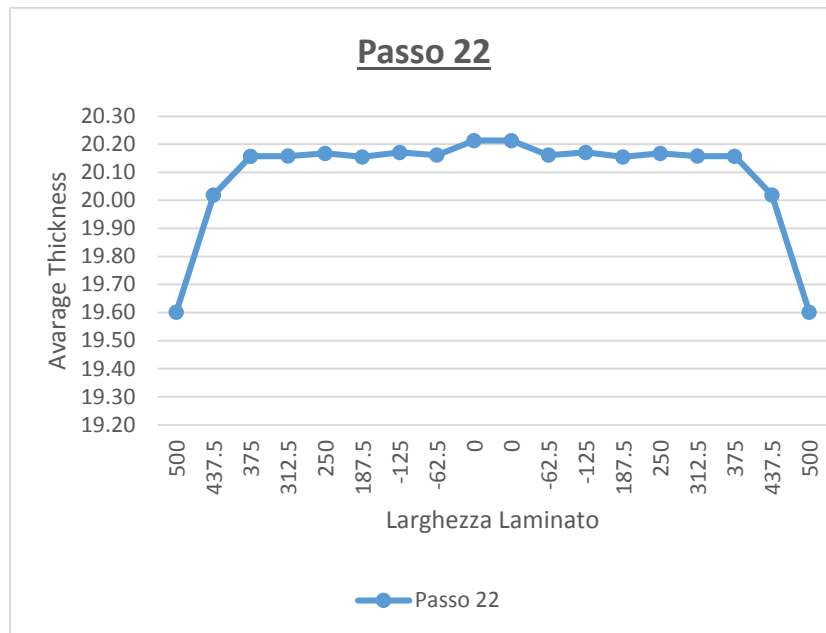


Figura 3.49– Profilo Laminato

Il valore medio del Crown (Refdist di 62.5 mm) calcolato con i suddetti valori è di 0.01% con punte in alcune sezioni trasversali di 0.03%.

Il modello realizzato con Marc/Mentat presenta un valore di Crown migliore rispetto a quello del modello realizzato in Simufact, la differenza di Crown tra il modello in Marc e quello in Simufact è dovuta essenzialmente alla tipologia di discretizzazione. Il laminato in Marc infatti è stato discretizzato con un numero molto maggiore di elementi 24000 rispetto ai 4500 del modello realizzato in Marc, lo stesso vale per il cilindro di lavoro il quale ha previsto in Simufact 11000 elementi mentre in Marc sono stati utilizzati 23104 elementi.

Capitolo 4

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di Dottorato ha mostrato l'applicabilità del processo di simulazione numerica in campo non lineare alla valutazione del crown nella laminazione a caldo di bramme di alluminio.

Sono stati simulati gli ultimi tre passi relativi ad una sequenza di laminazione per una lega di alluminio 8009 e spessore finale di 6mm.

Come si può osservare dal Grafico 3.3, Grafico 3.4 e dal Grafico 3.5, lo spessore finale a termine di ciascun passo, presenta tuttavia, una deviazione rispetto al valore di target, definito in base a valori sperimentali aziendali, nell'ordine del millimetro.

La forbice tra il valore reale e il valore nominale, va aumentando con il susseguirsi dei passi di laminazione, e raggiunge il massimo per il passo 24, dove la differenza arriva ad un valore di 1,6 mm.

Tale differenza è dovuta a diversi fattori non ancora completamente considerati nel modello numerico implementato.

In particolare bisogna affinare il modello introducendo:

- La curva reale di comportamento del materiale in lavorazione;
- Le effettive condizioni di refrigerazione ed il profilo termico dei cilindri;
- Le effettive condizioni di movimento dei cilindri

Nel modello dovrebbe essere considerata anche la variazione del gap che viene normalmente utilizzata in azienda, dove il sistema denominato AGC, modifica in tempo reale la posizione dei cilindri, aumentando o riducendo l'apertura in funzione dei segnali che arrivano dal sistema di rilevazione dello spessore.

A sostegno di quanto suddetto, in basso è riportato il tracciato reale dell'apertura dei cilindri nel tempo, per il 24° passo di un a lega 8009.

Si può notare come l'apertura nelle fasi iniziali del passo considerato, sia inferiore al valore di target.

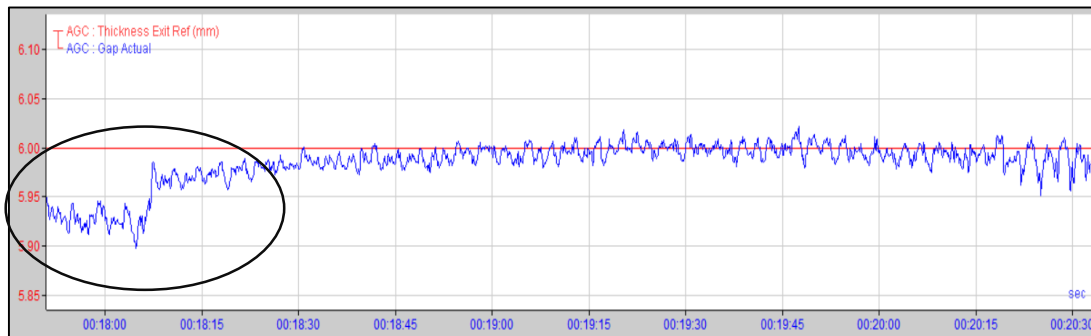


Figura 4.1 – Apertura gap cilindri - AGC

Infine resta ancora da valutare il meccanismo di bending idraulico. Anche in questo caso sarebbe necessario uno studio specifico su due fronti. Un primo fronte mirato a comprendere meglio il meccanismo di applicazione del bending mediante prove sperimentali sull'impianto ed minimizzando il fattore umano, che inserisce una arbitrarietà nelle osservazioni. Infatti dalle osservazioni fatte durante il periodo trascorso in azienda, è frequente che per una stessa tipologia di lega con uguale scheda di laminazione siano applicati agli ultimi passi, diversi valori di bending, con conseguente diversa flessione del cilindro.

Il secondo fronte invece riguarda strettamente l'aspetto simulativo, ed in particolare la modalità di implementazione del meccanismo nel modello.

Il modello così completato dovrà essere oggetto di verifiche con il confronto con dati sperimentali al fine di ottenere un modello calibrato per effettuare valutazioni previsionali del crown.

APPENDICE

A.1 Carte di controllo

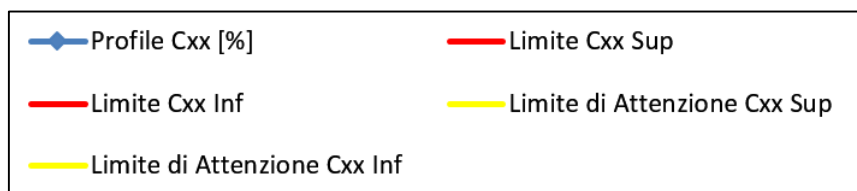
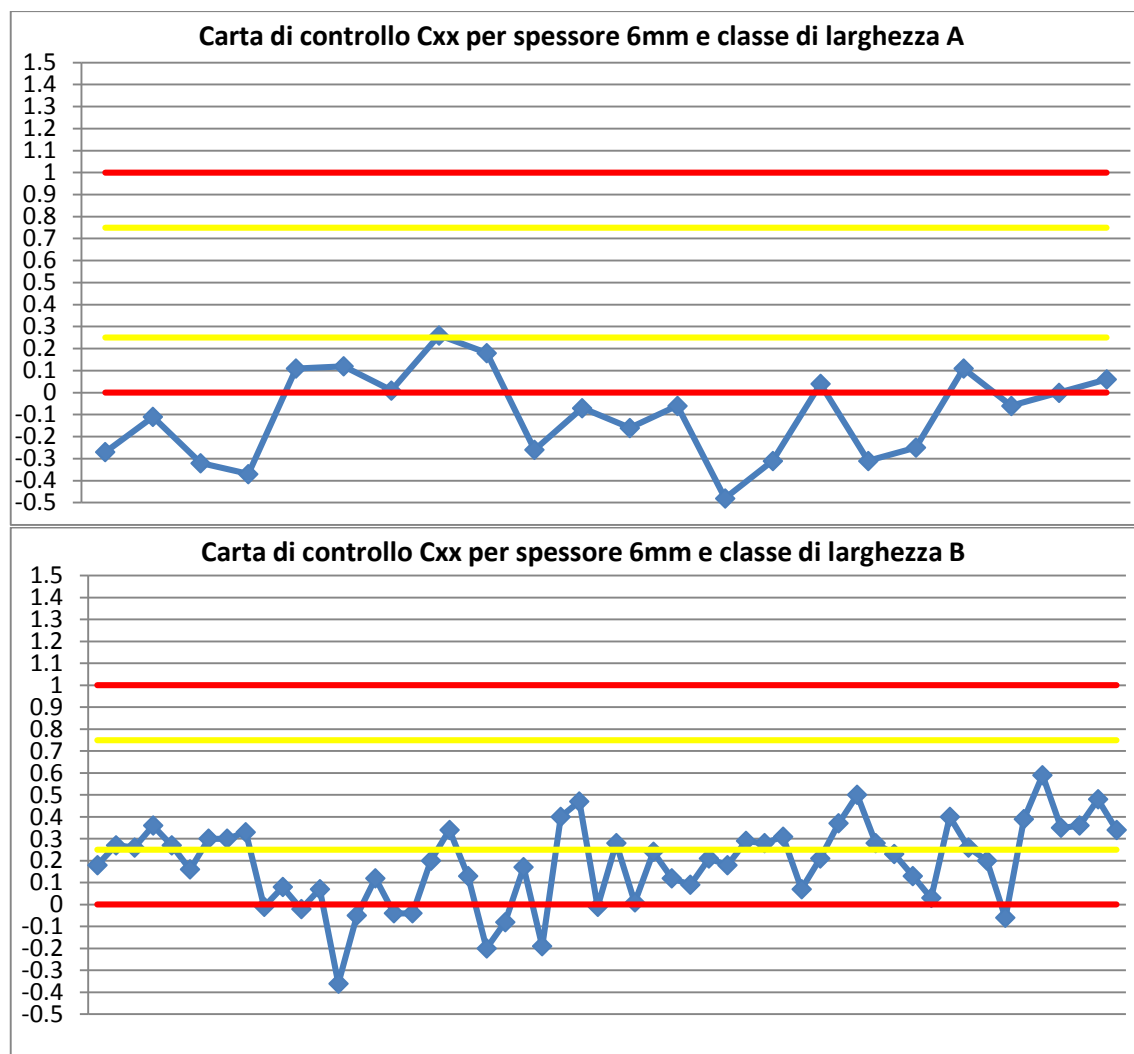
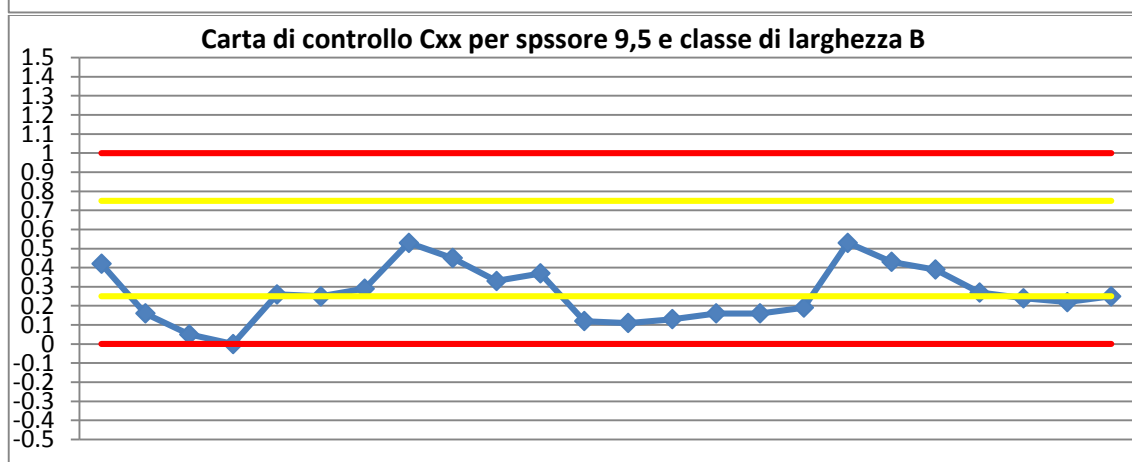
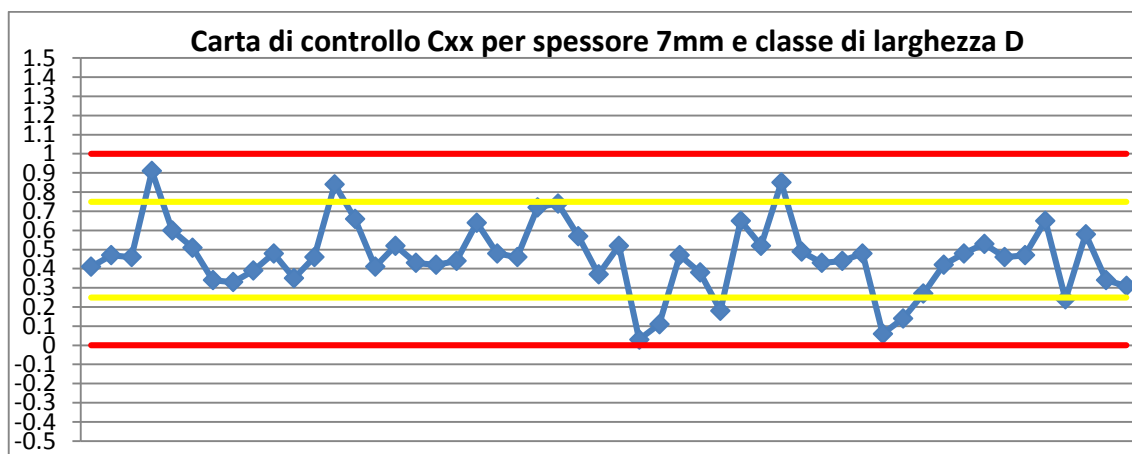


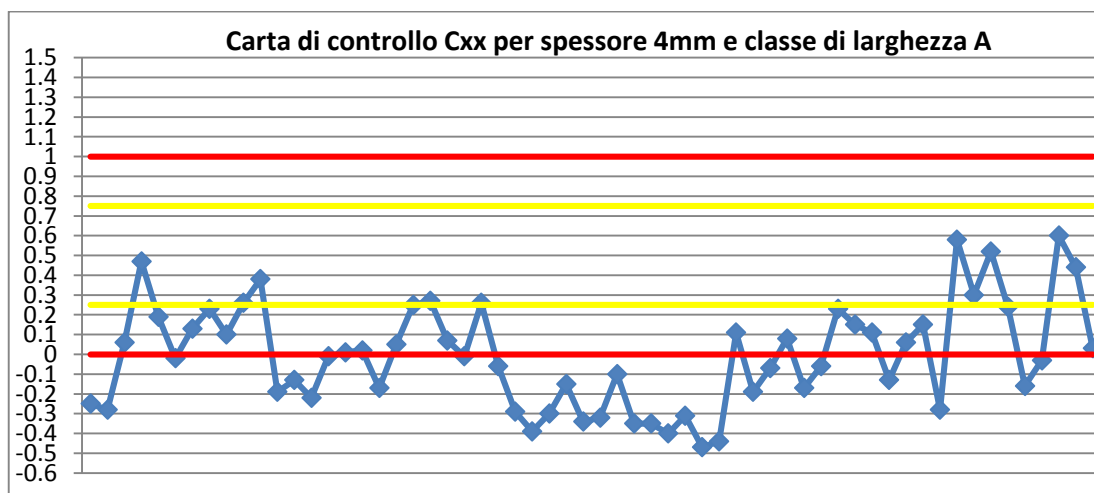
Figura A.1 – Legenda

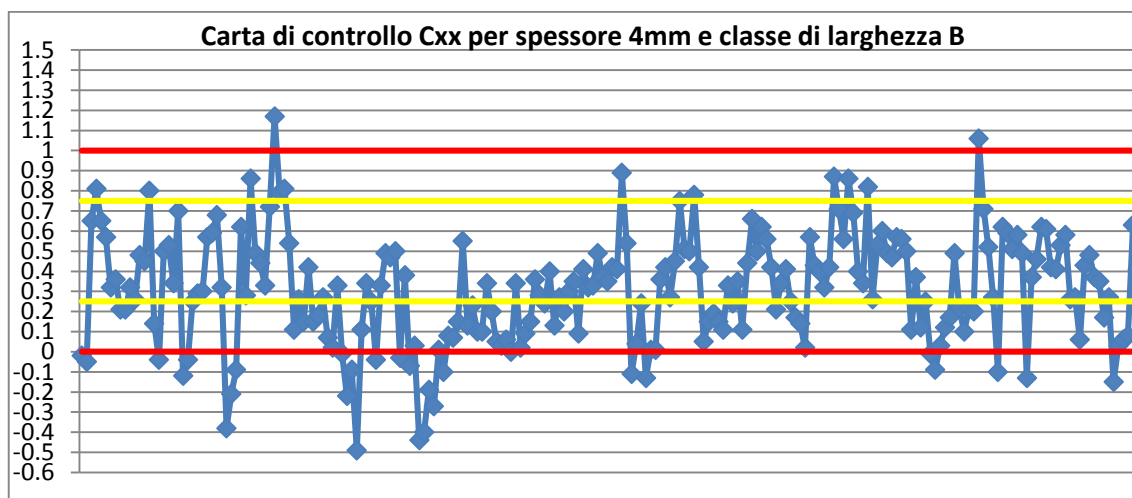
a. Lega 1050



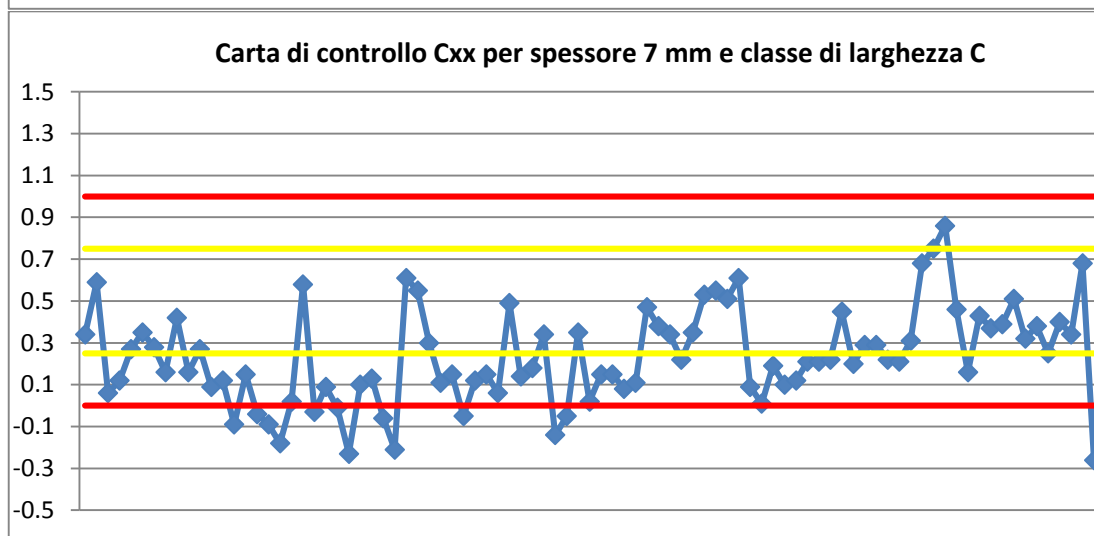
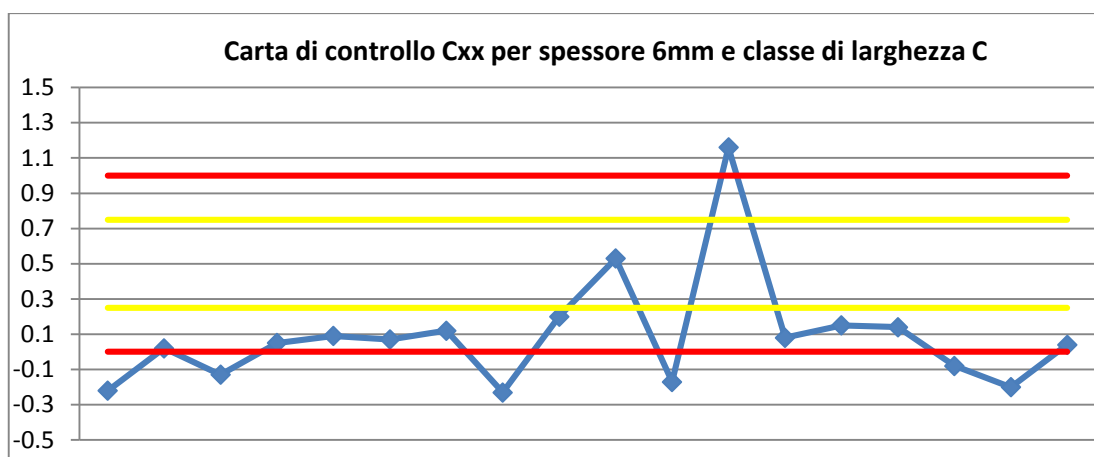


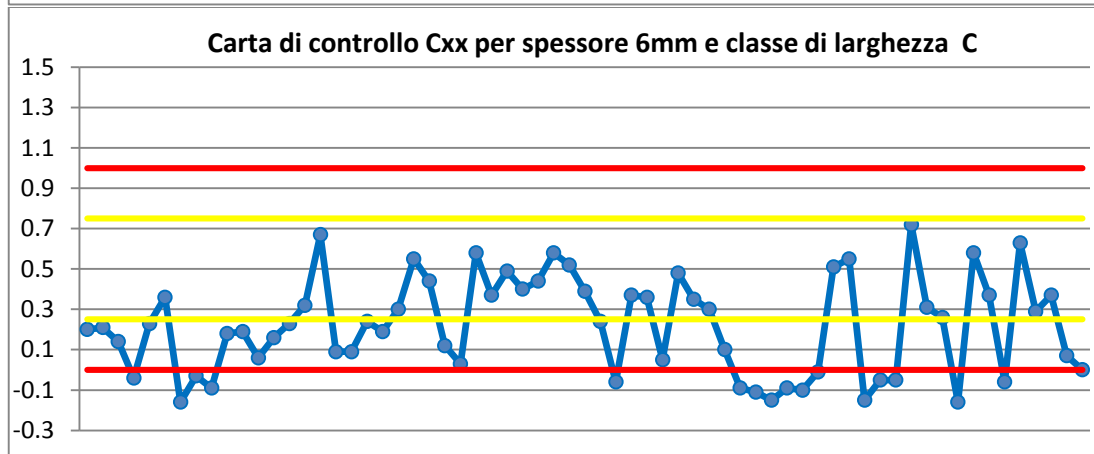
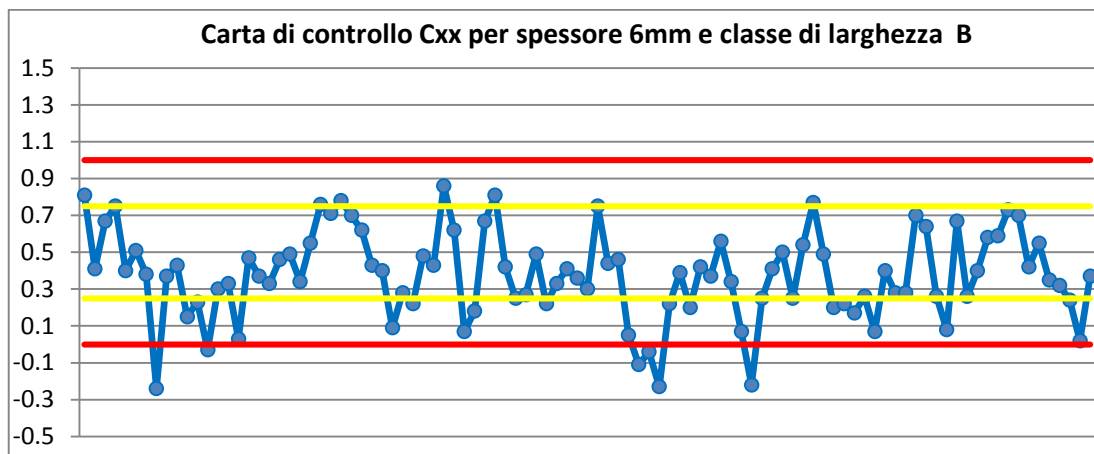
b. Lega 1200



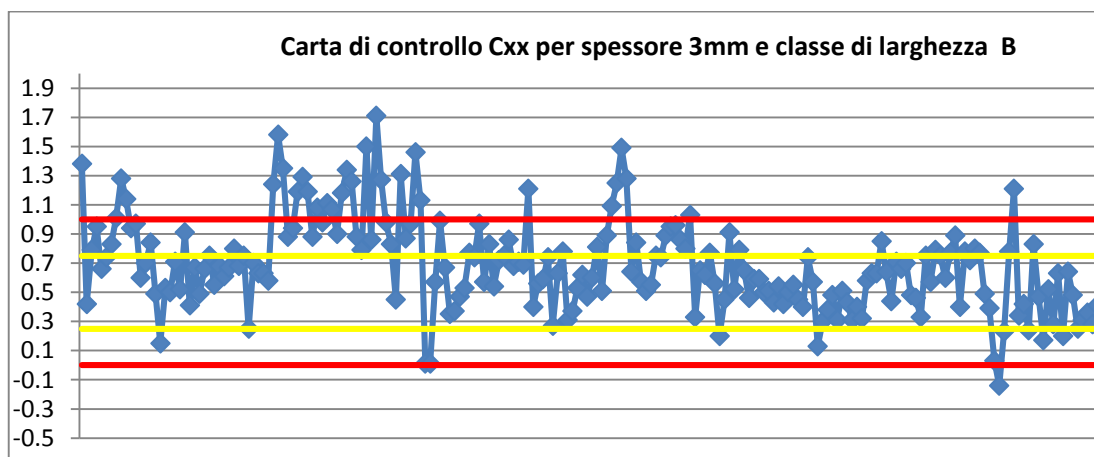


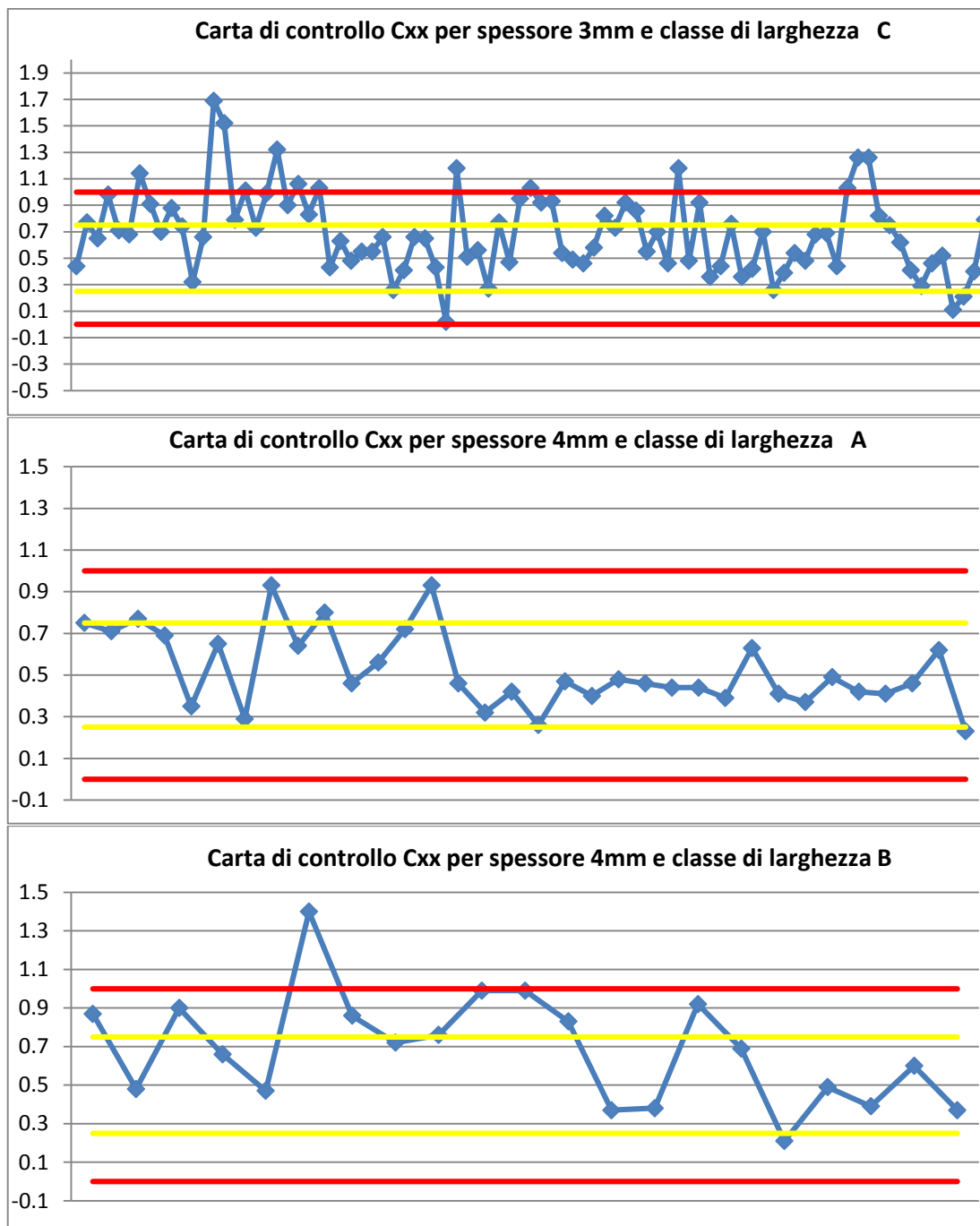
c. Lega 1230

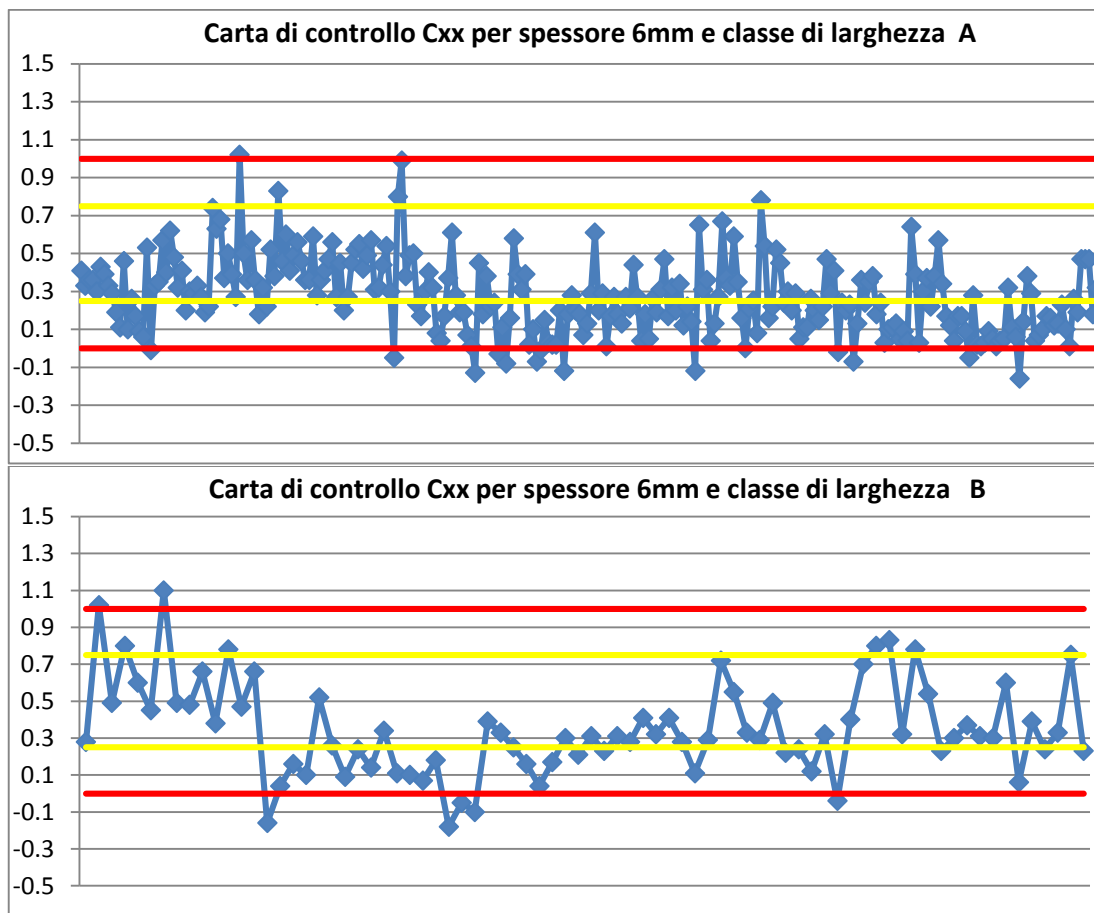




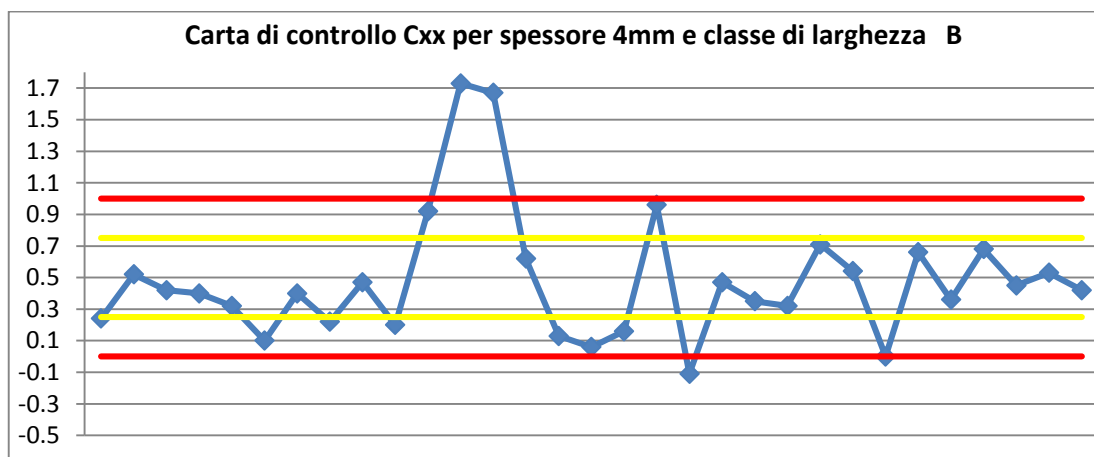
d. Lega 3005

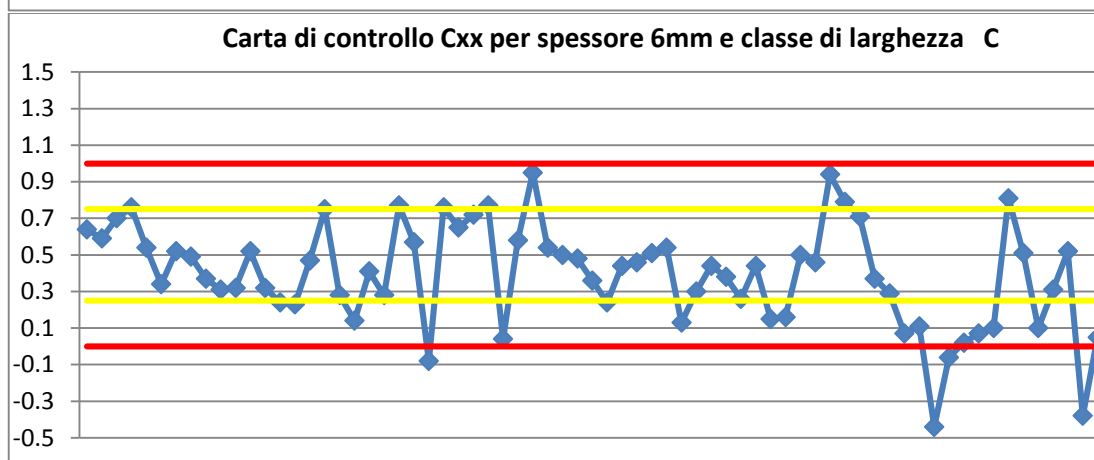
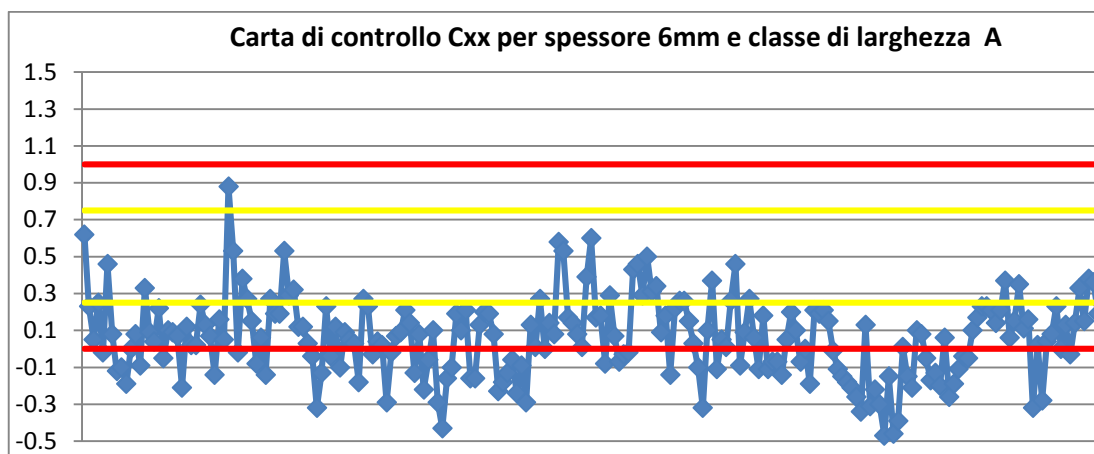




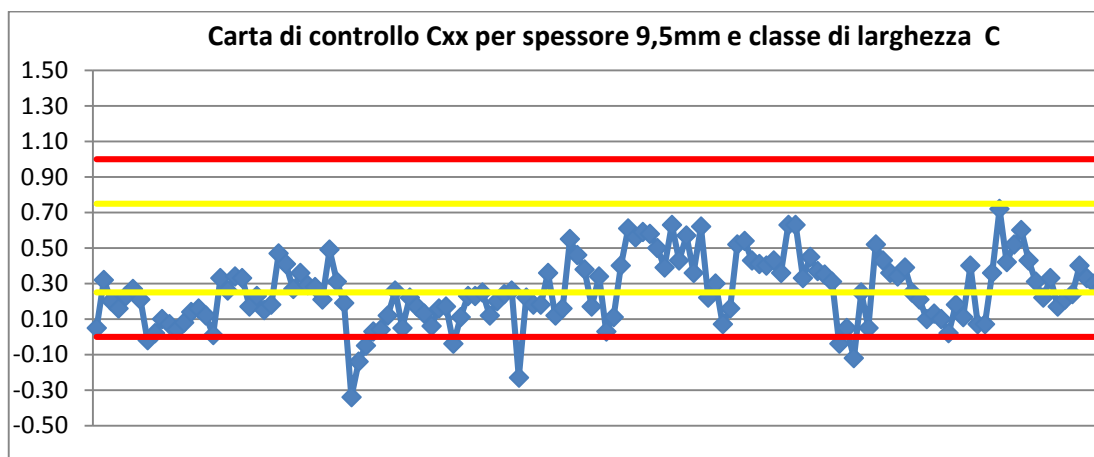


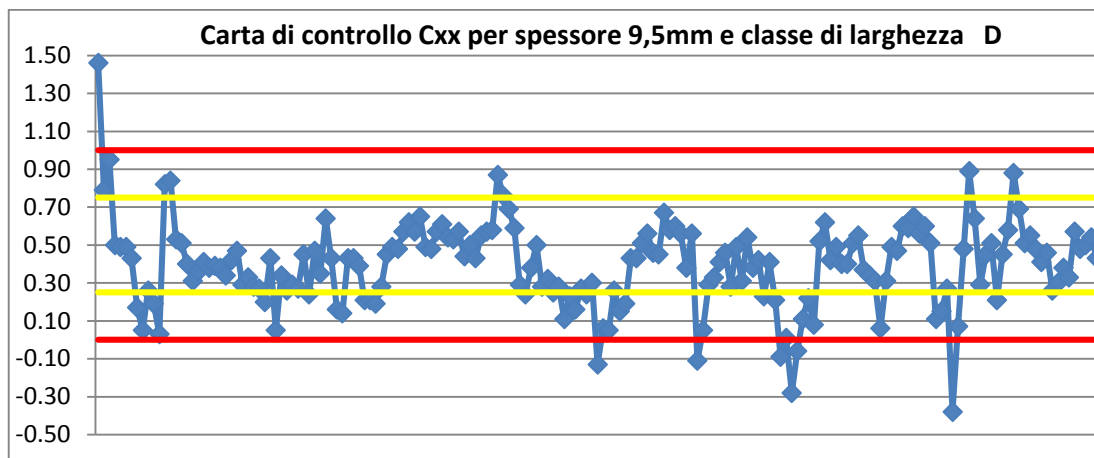
e. Lega 3105



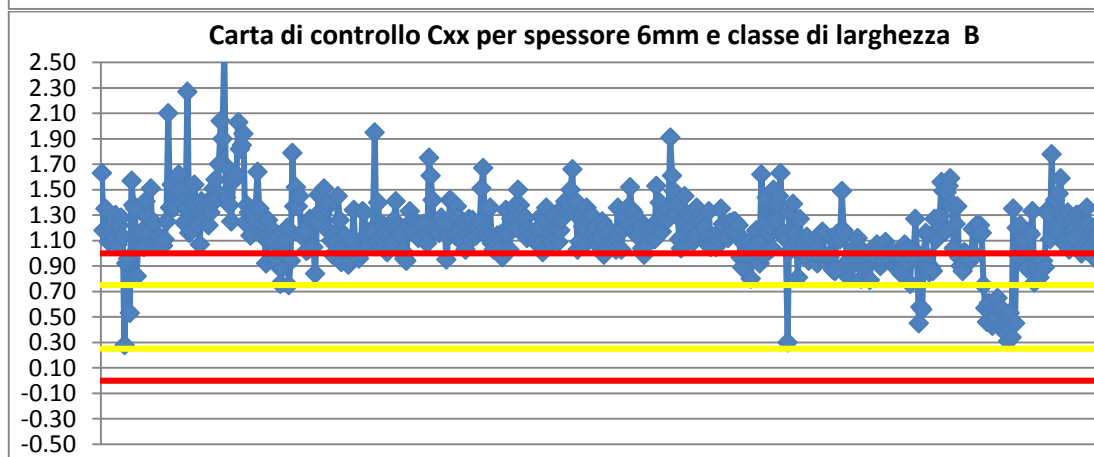
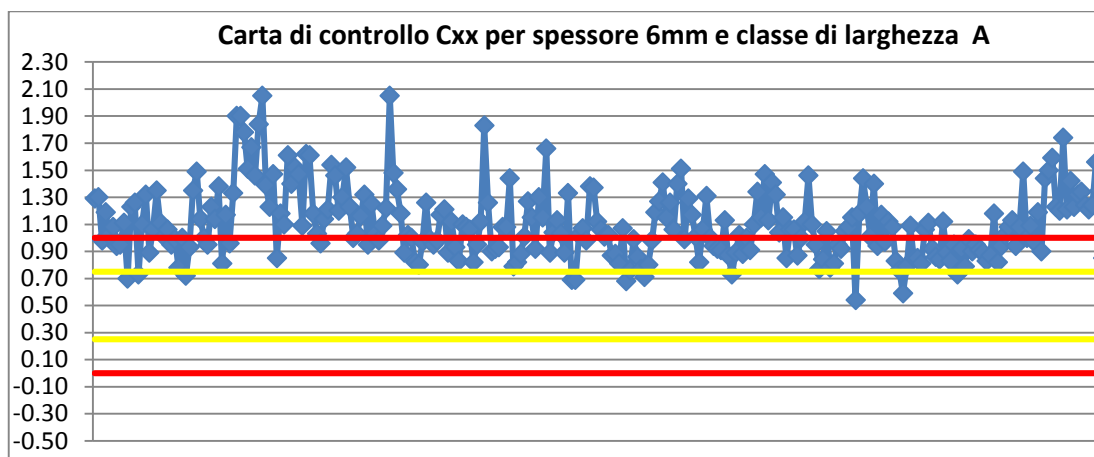


f. Lega 4006

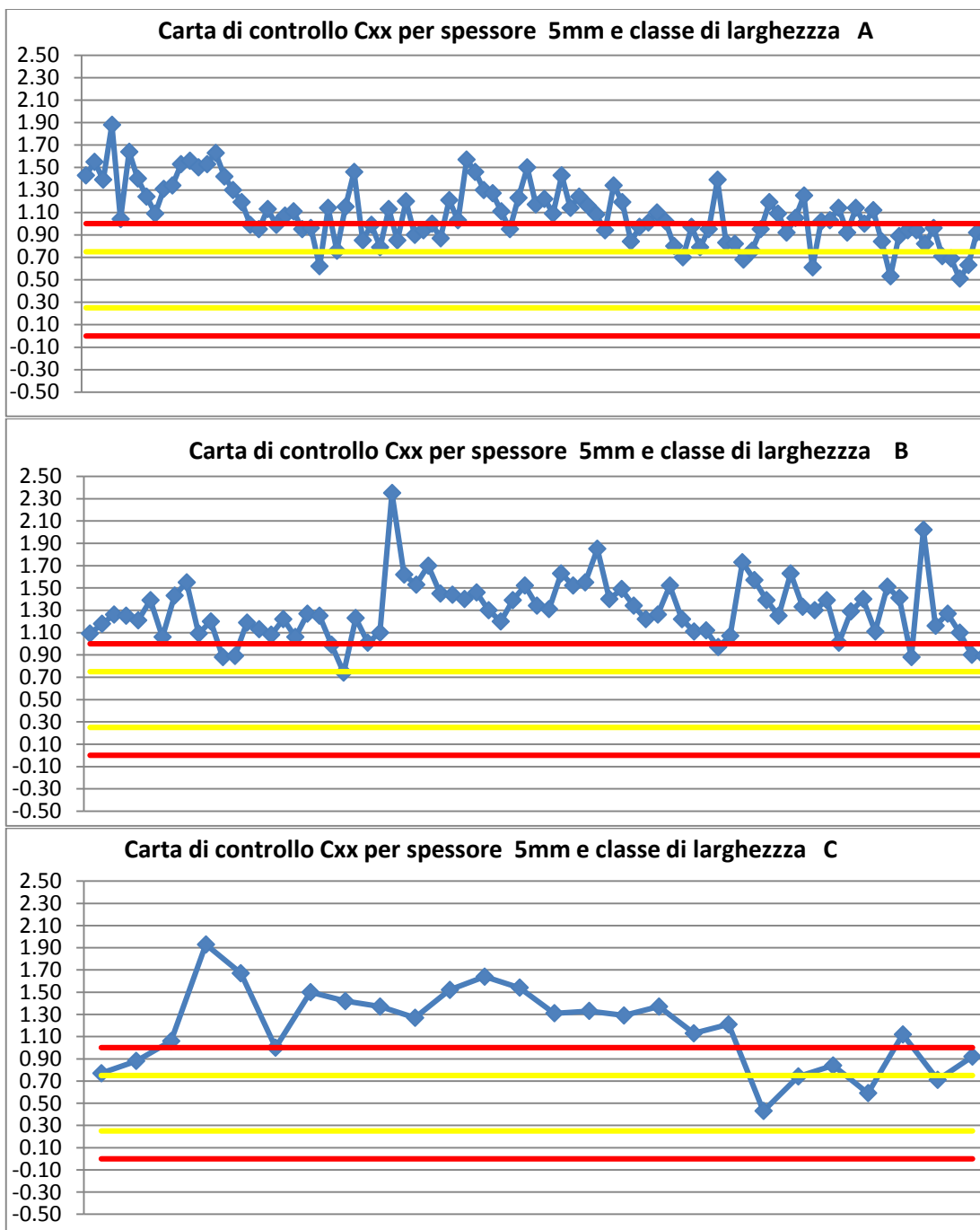




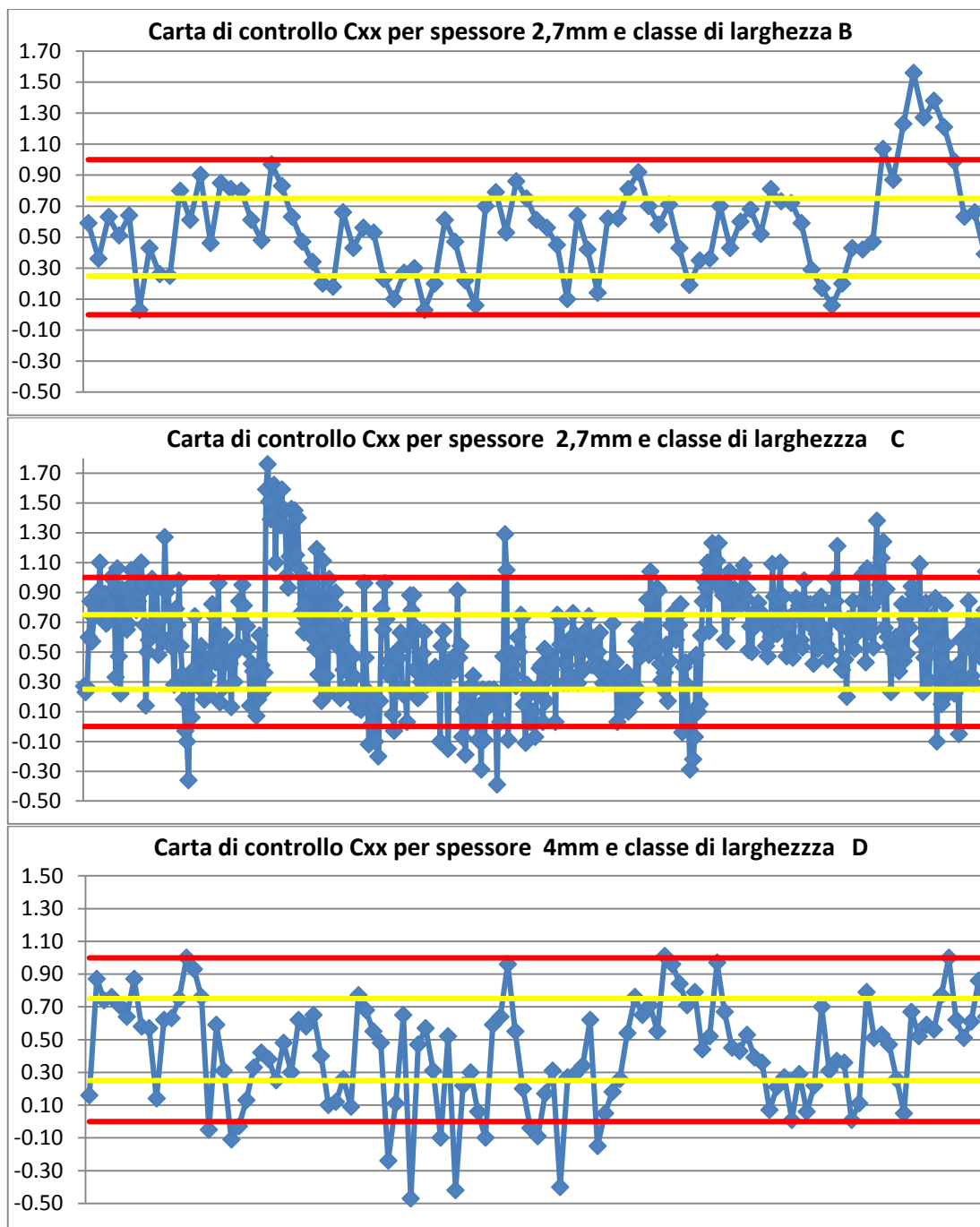
g. Lega 5052

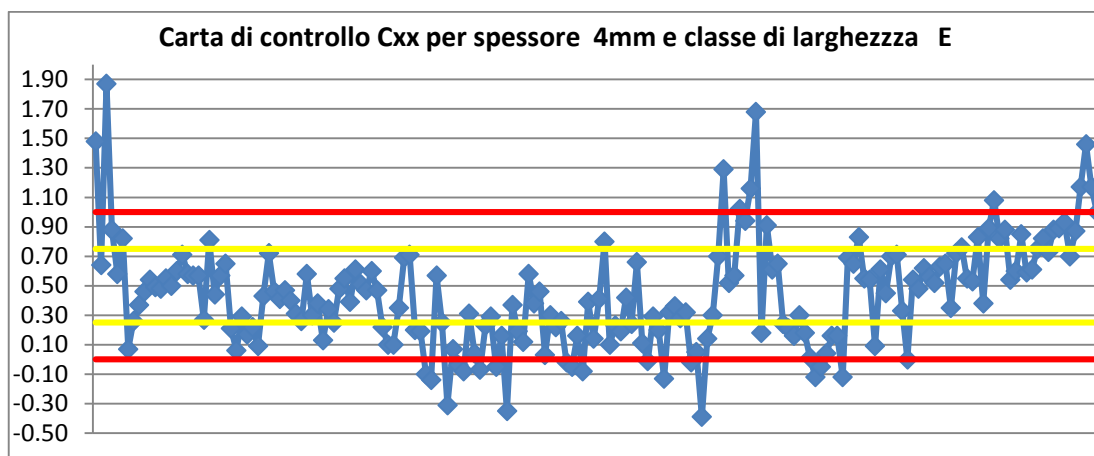


h. Lega 5754

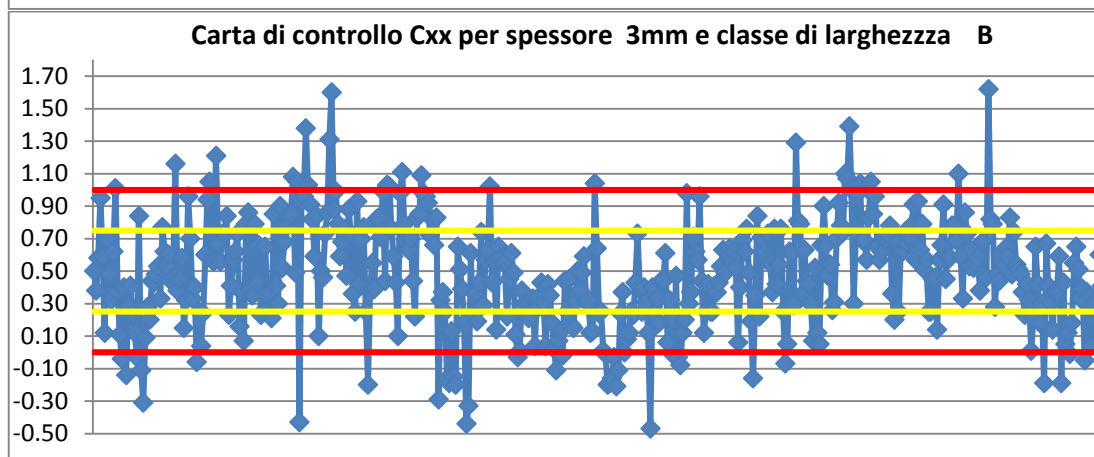
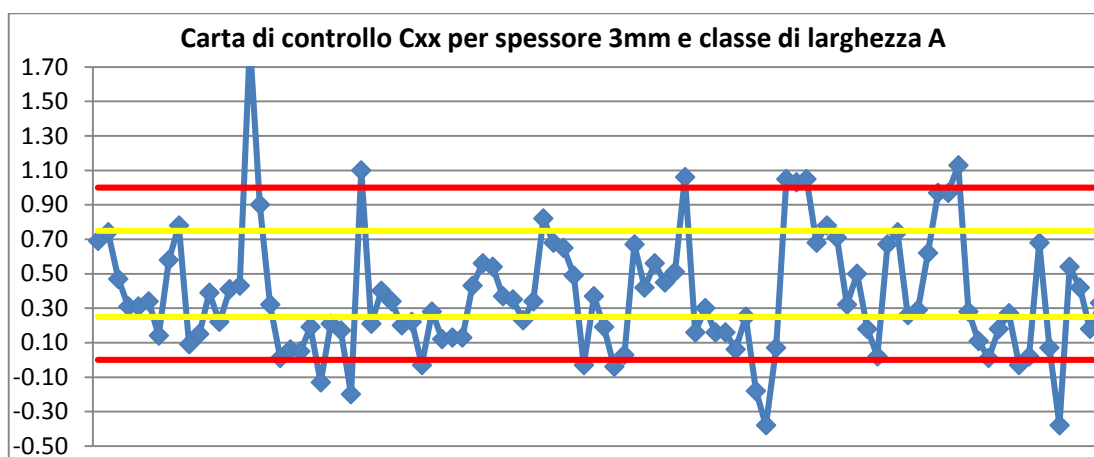


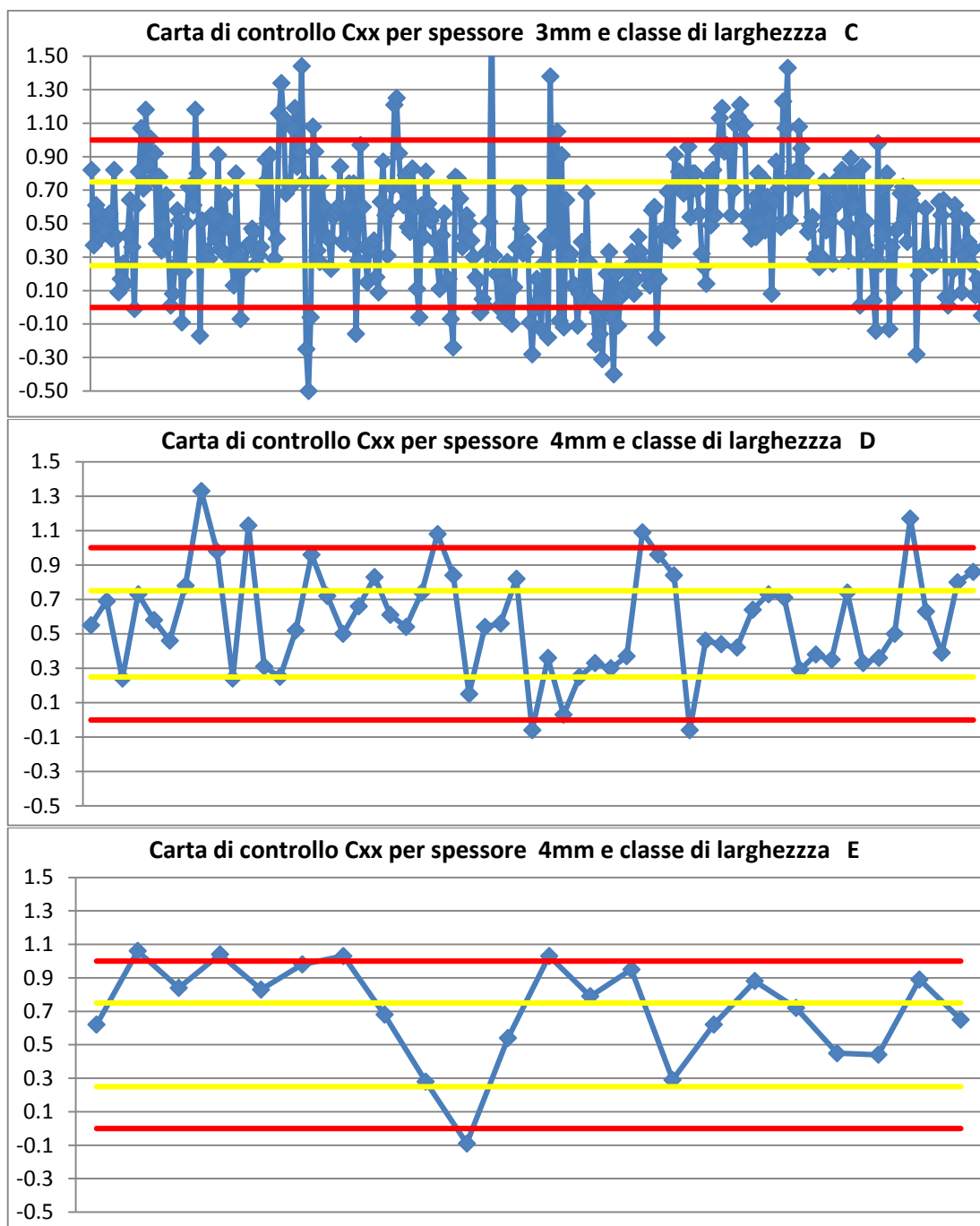
i. Lega 8006

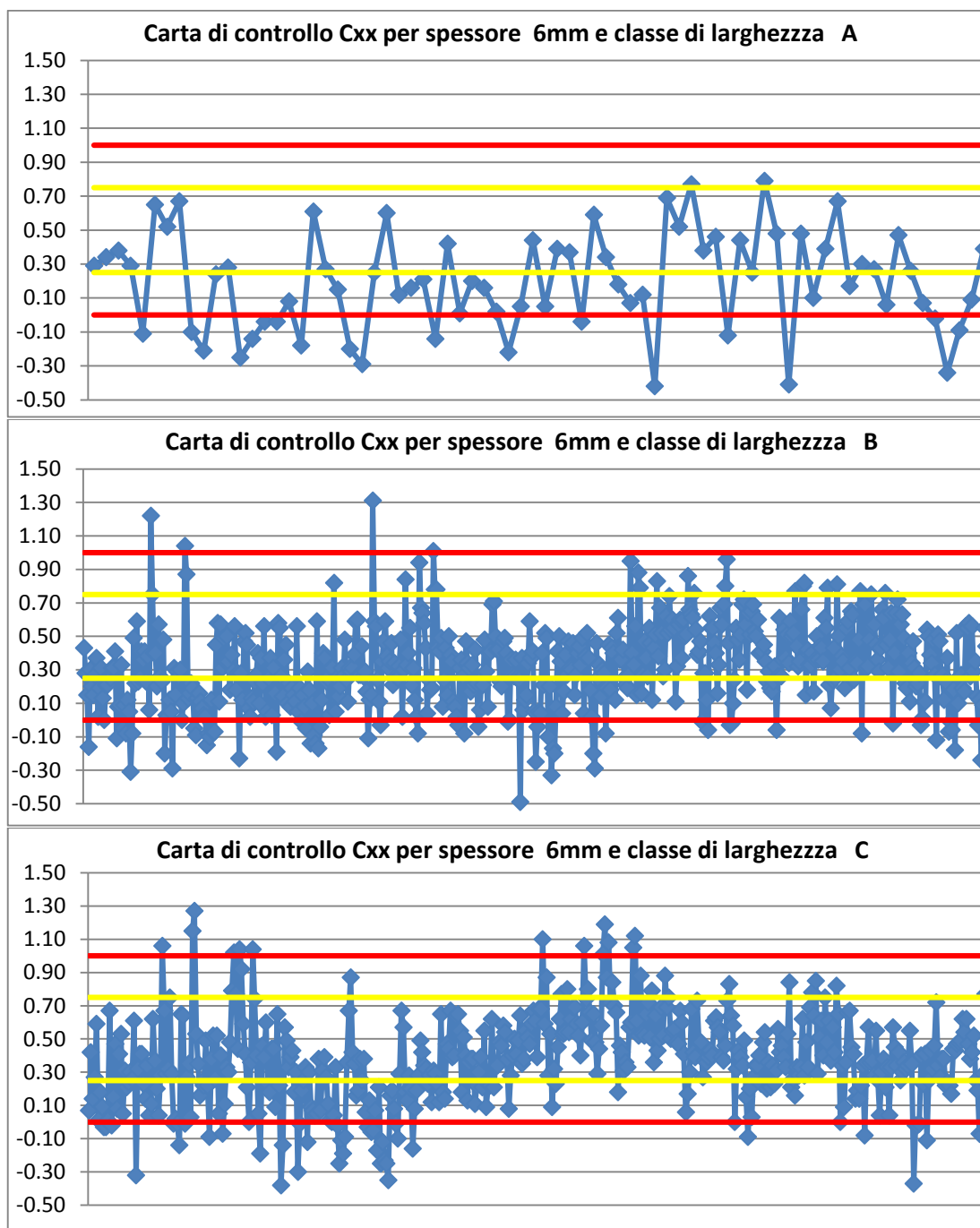


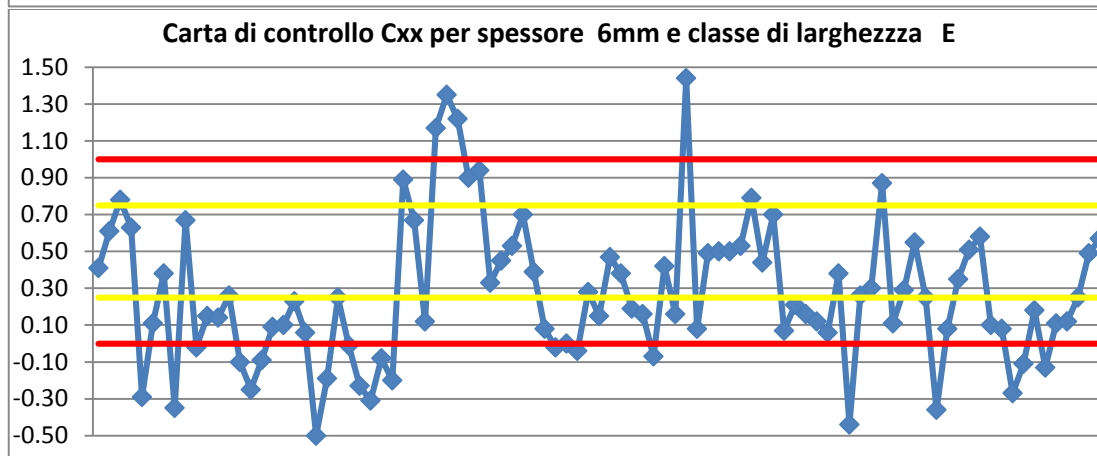
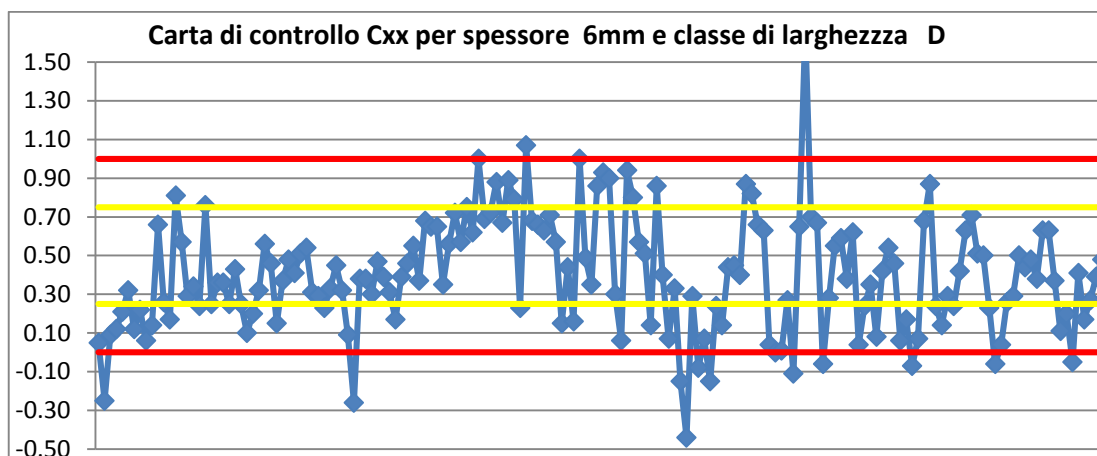


j. Lega 8009

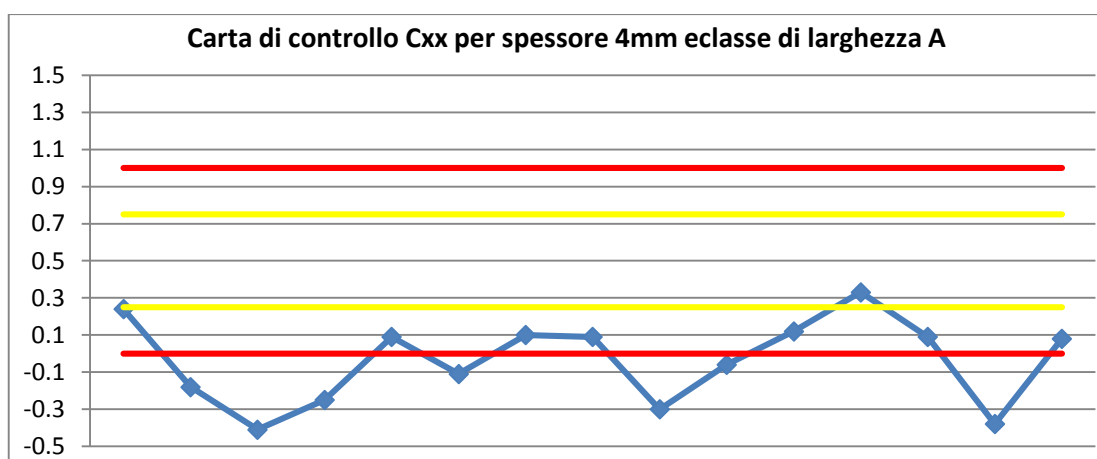


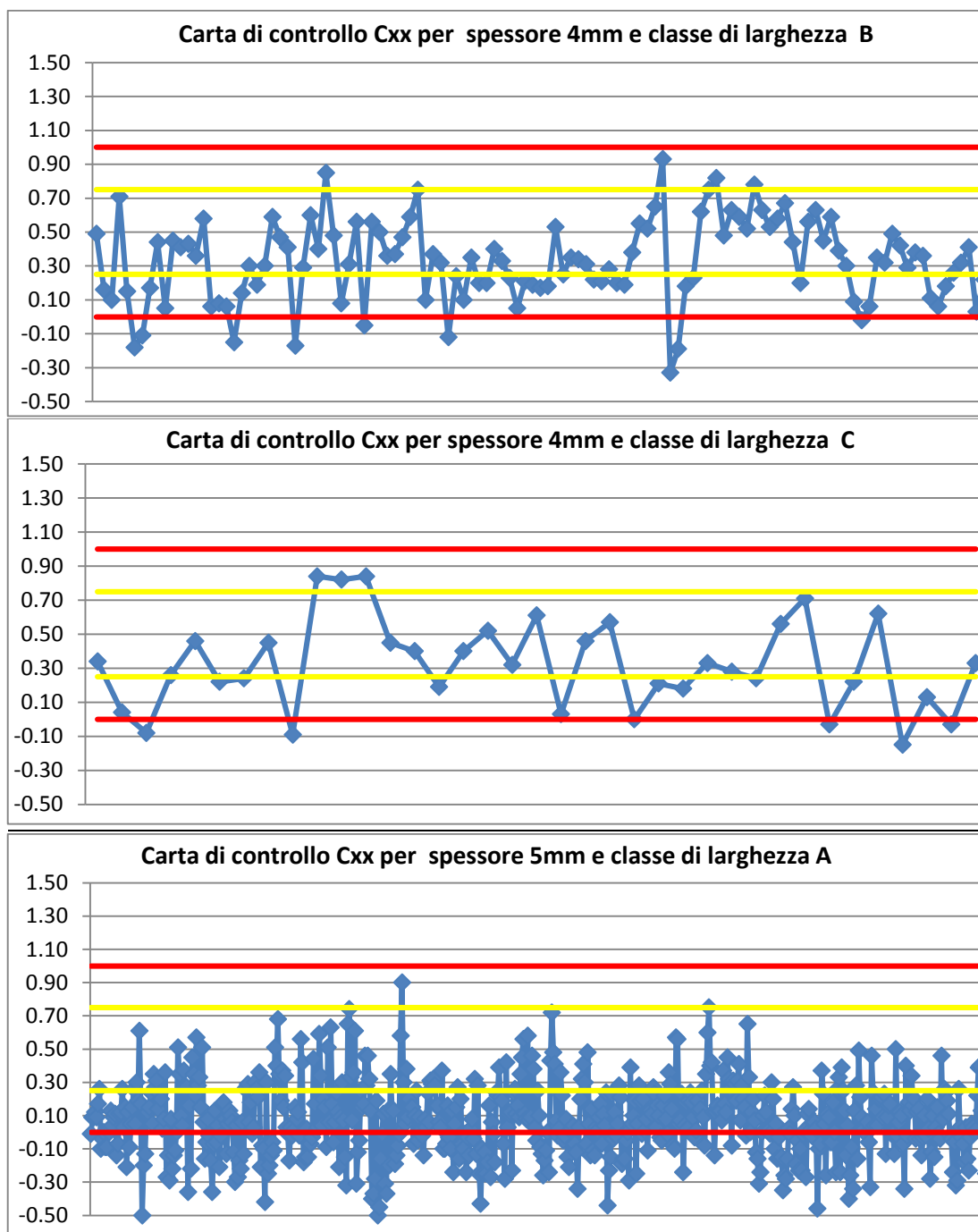


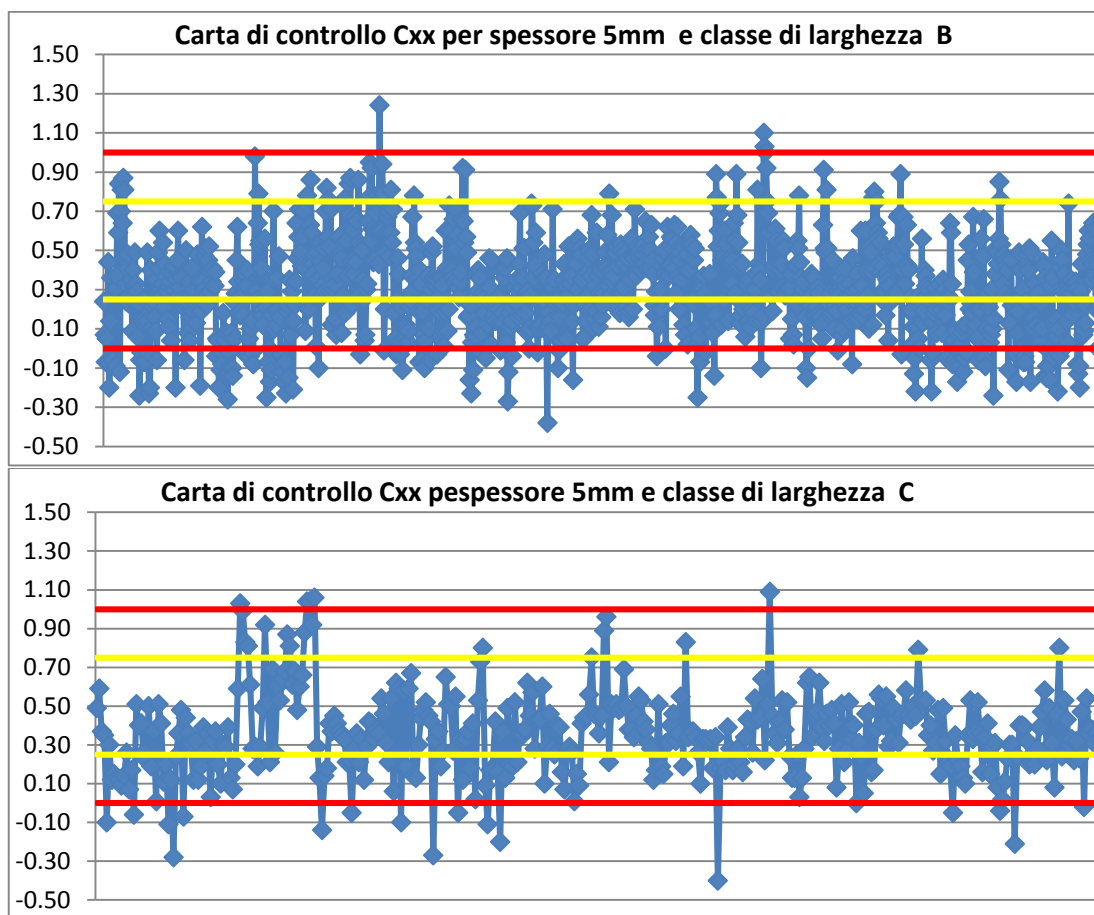




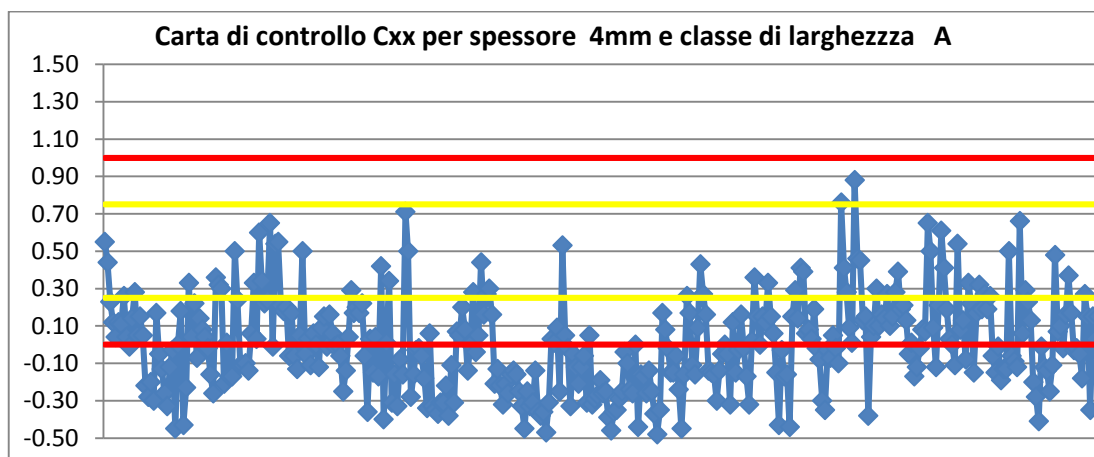
k. Lega 8011

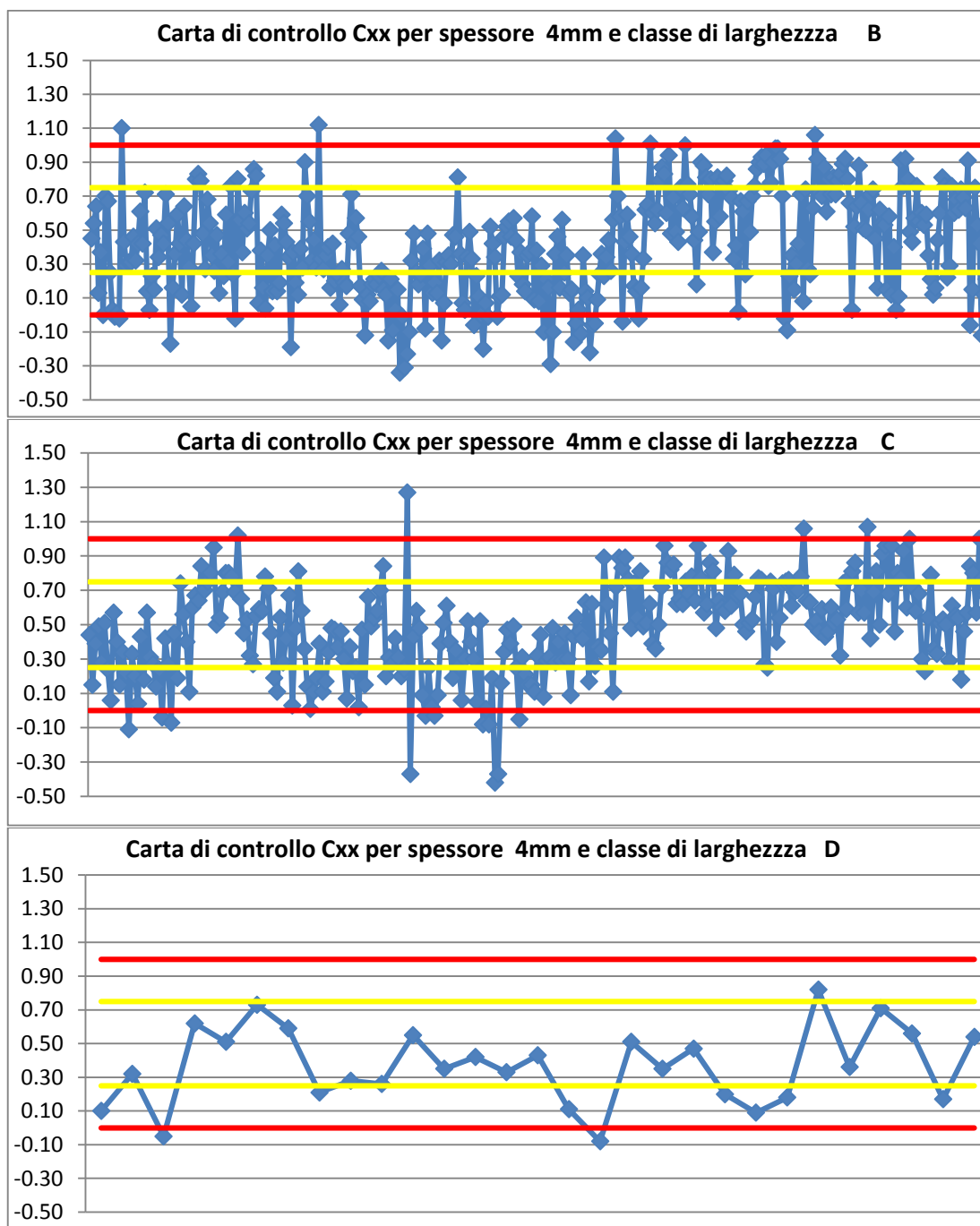




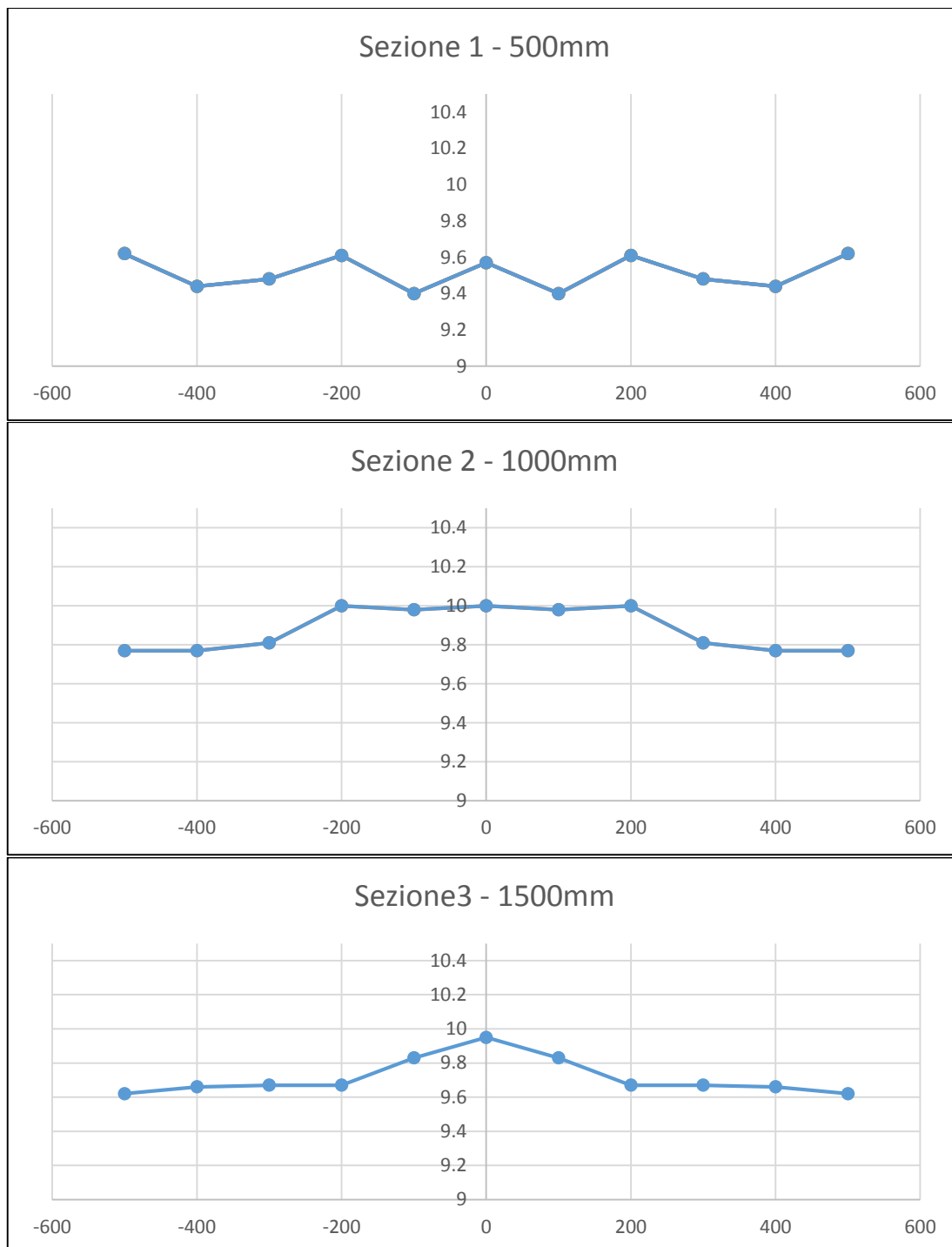


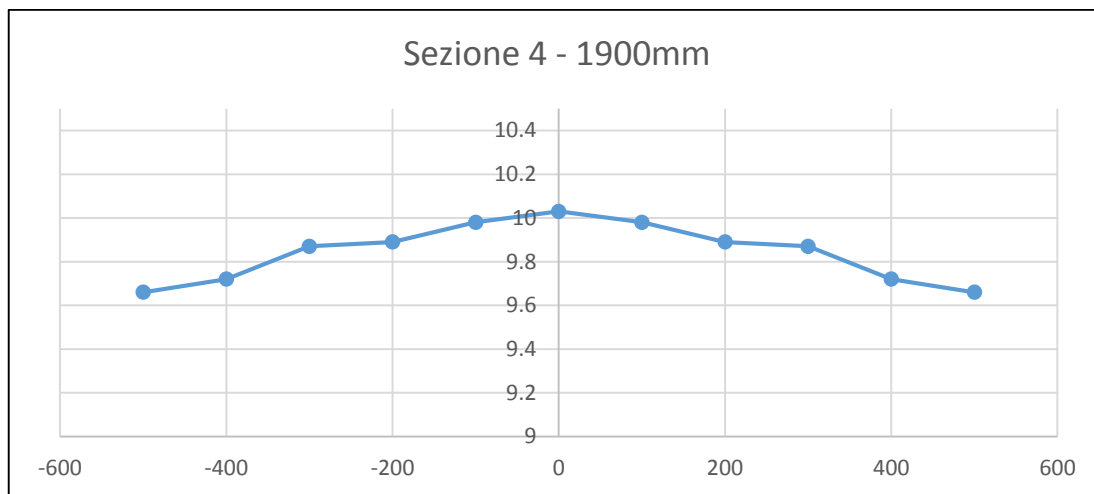
I. Lega 8079



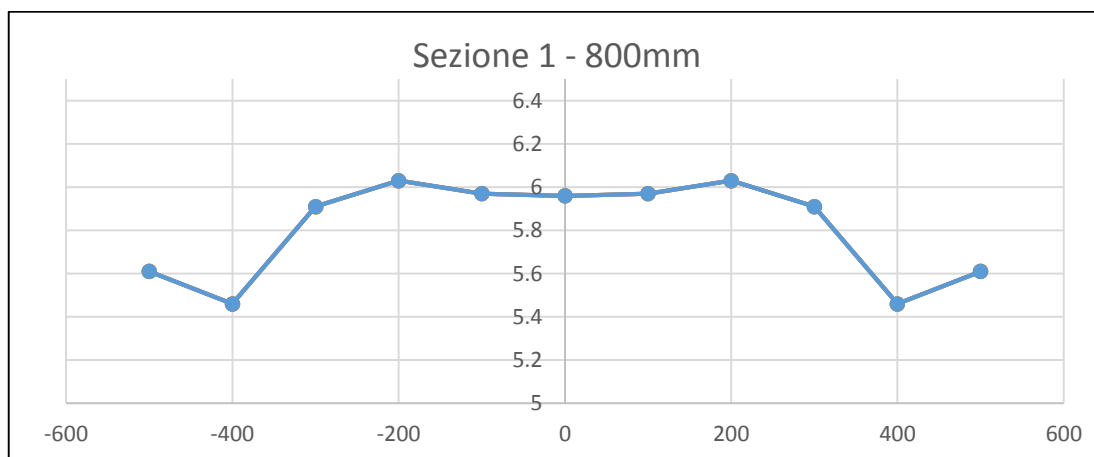


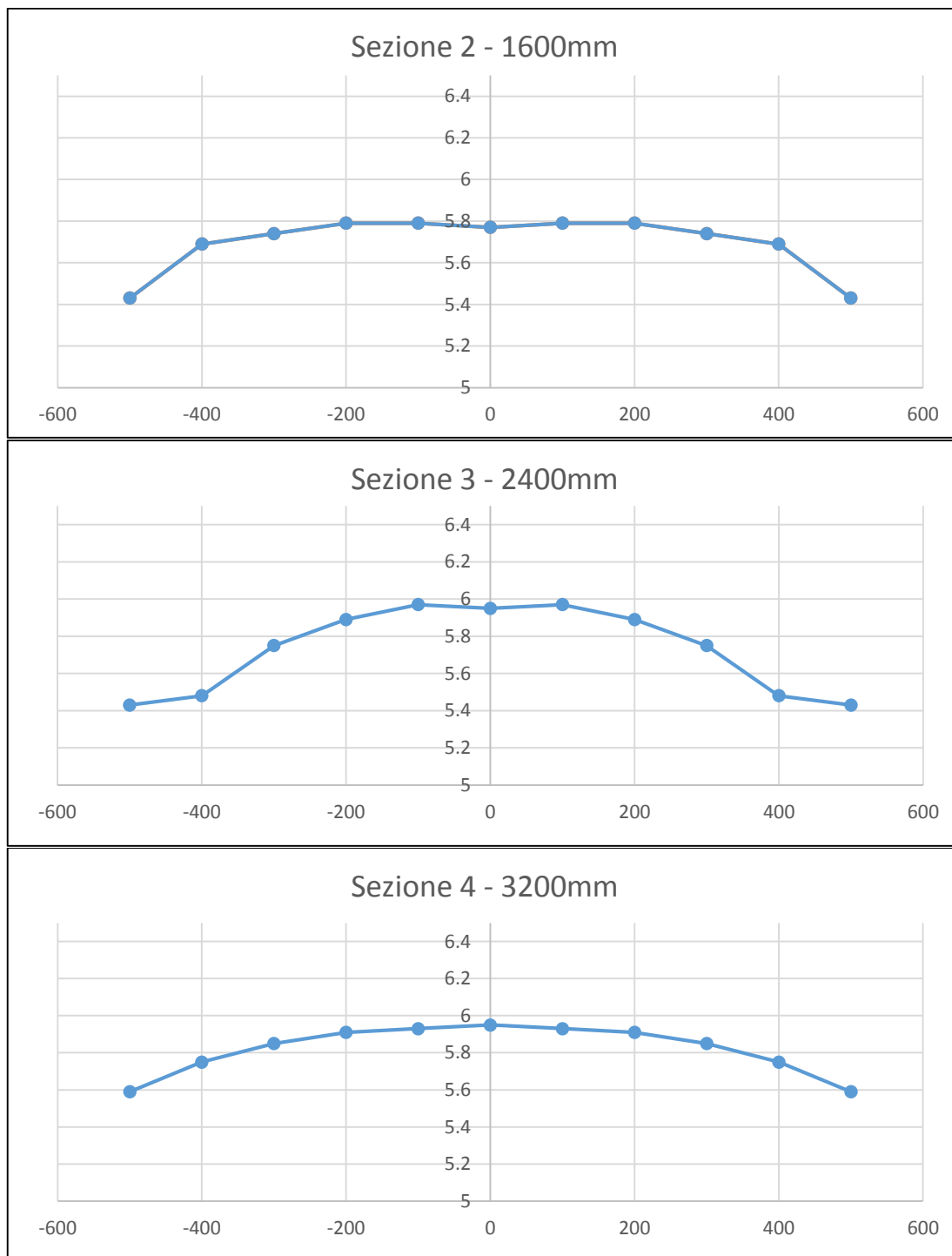
A.2 Profili di spessore analisi numerica: Passo 22



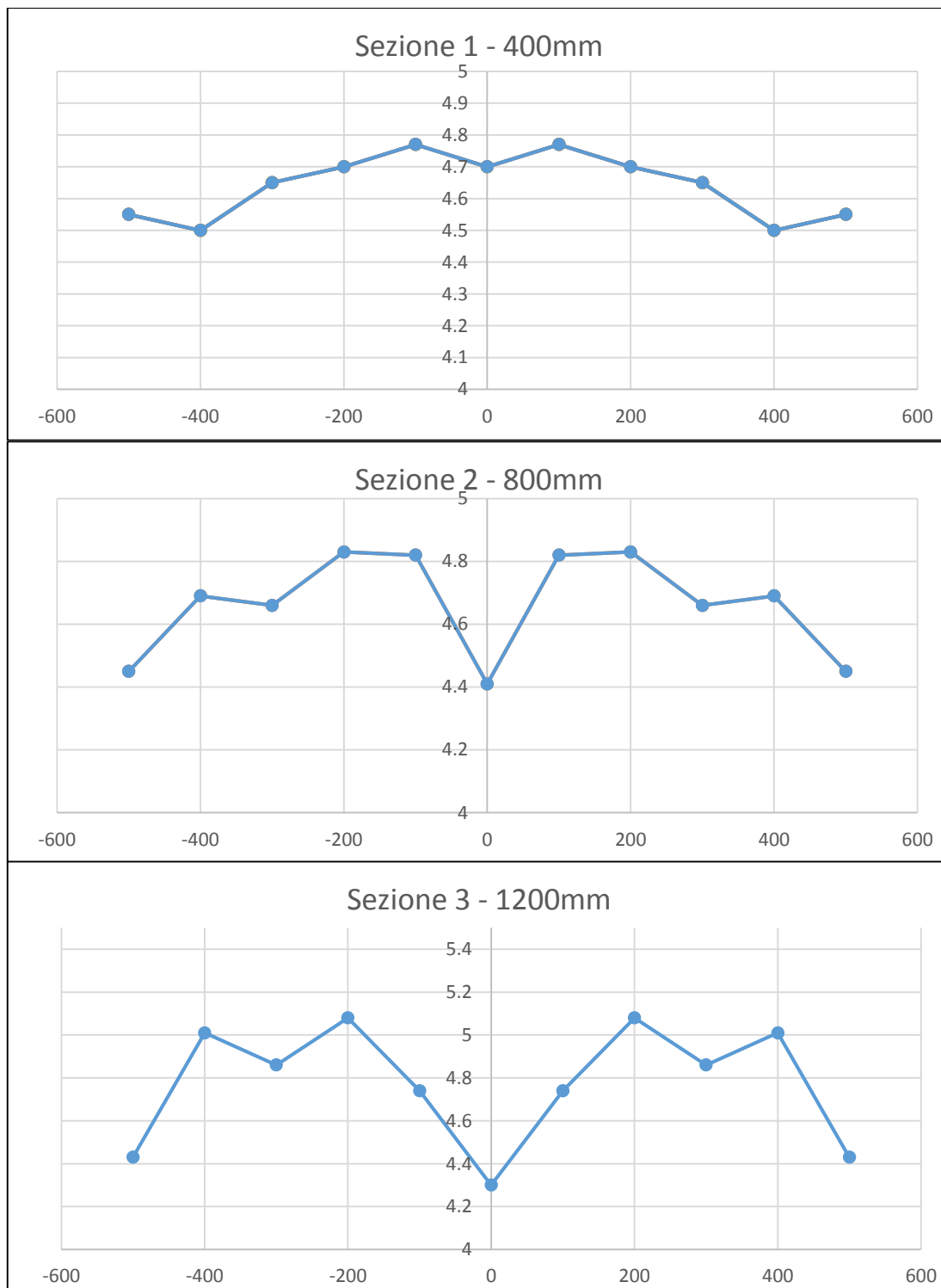


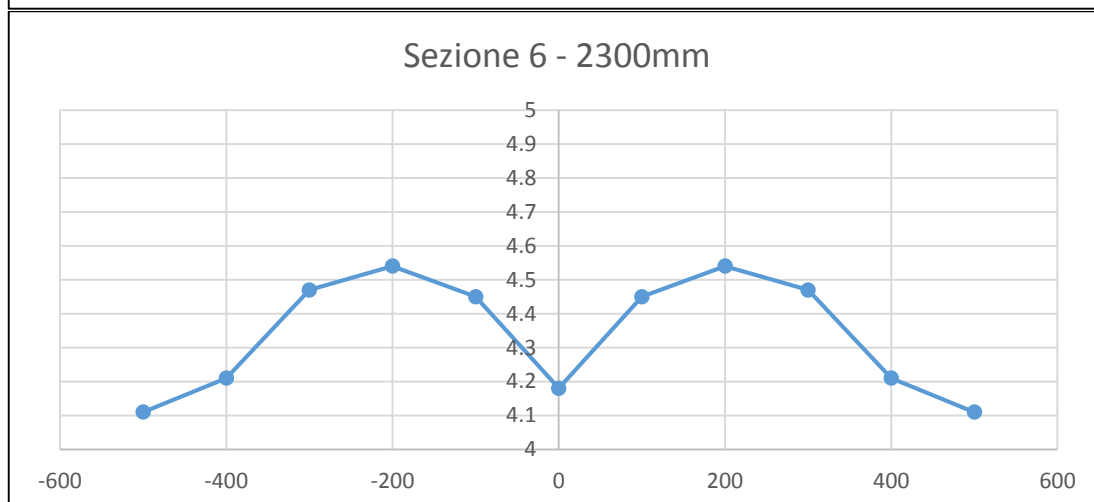
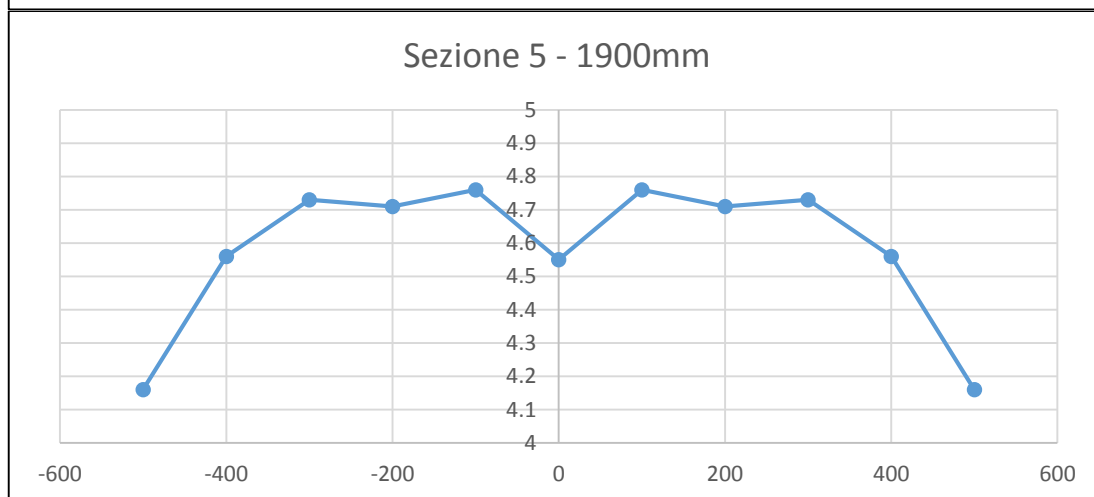
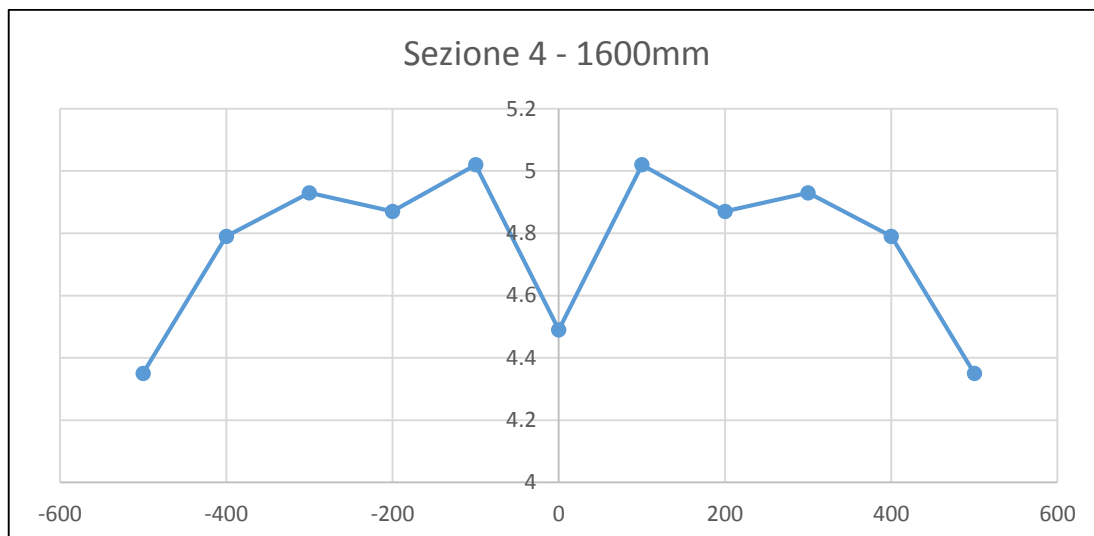
A.3 Profili di spessore analisi numerica: Passo 23

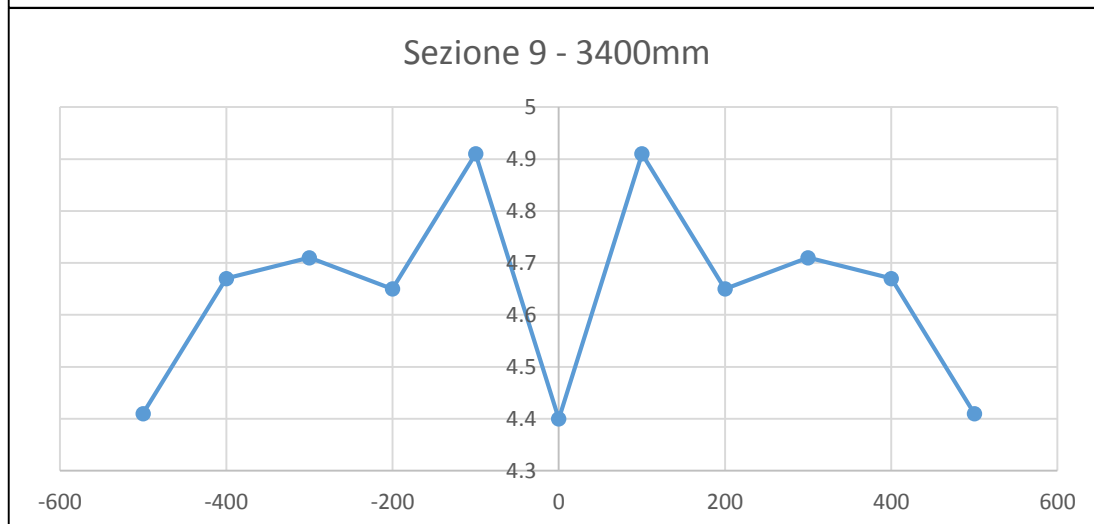
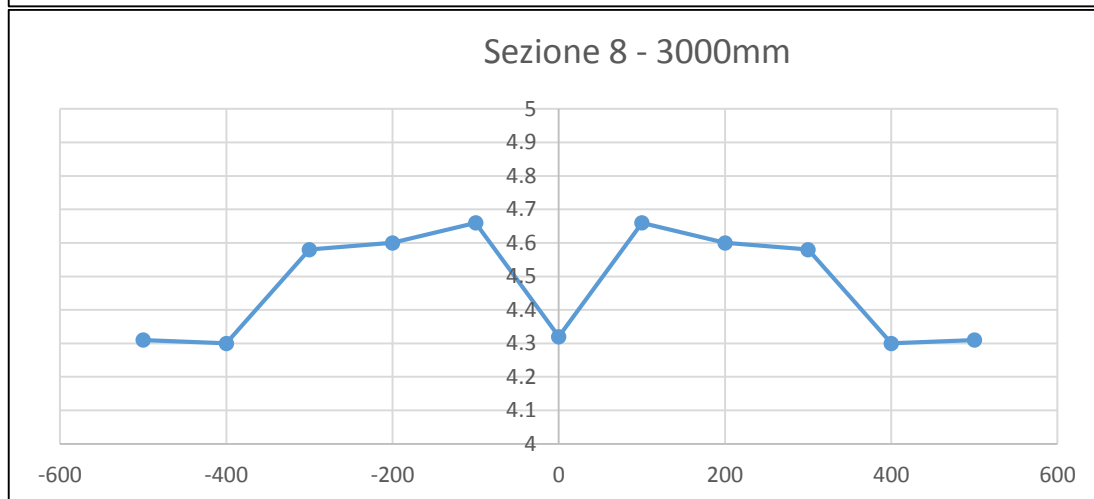
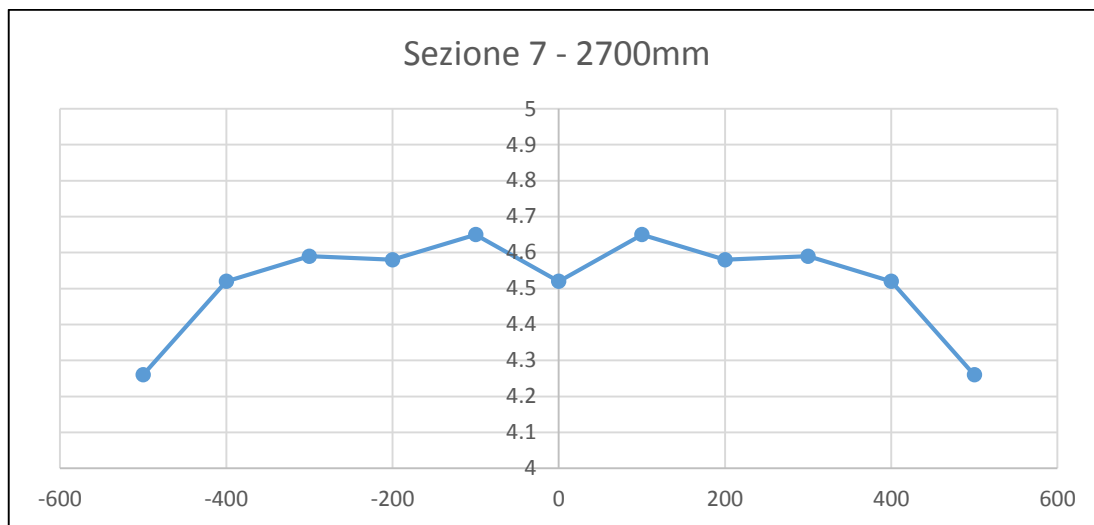


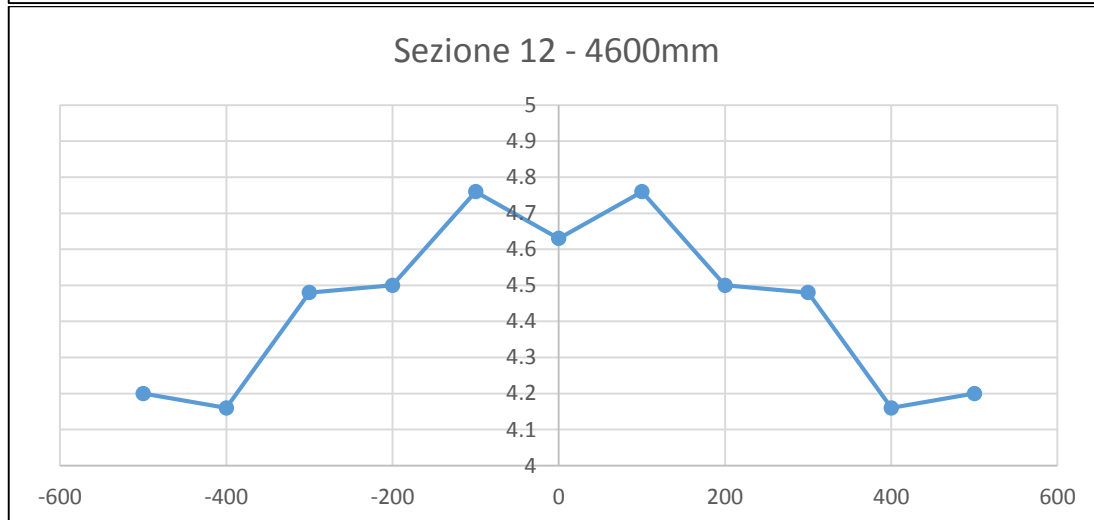
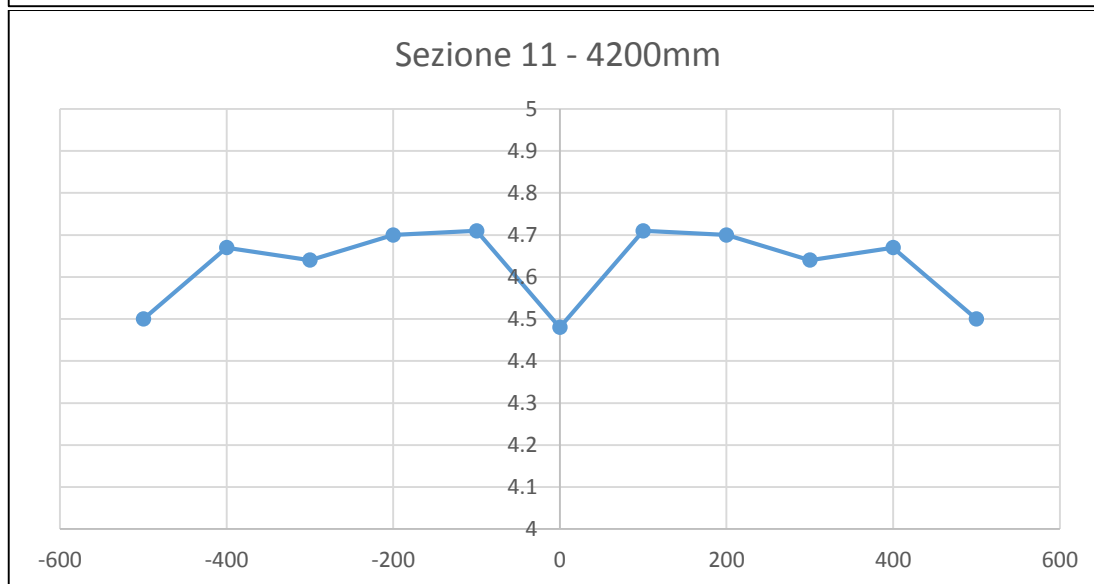
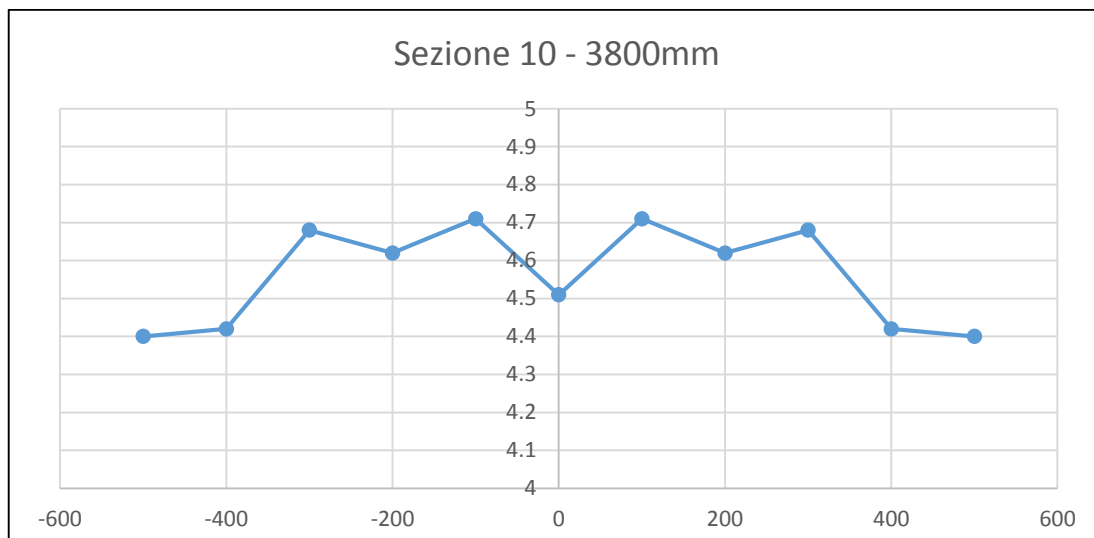


A.4 Profili di spessore analisi numerica: Passo 24









BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] ADRIANO MORAGLIO; *Presenza diretta sui mercati, la scelta che risulta vincente*; il Sole 24 ore; 16 Aprile 2013.
- [2] ZYGMUNT WUSATOWSKI; *Fundaments of rolling*; Pergamon press; 1969.
- [3] F.MAZZOLENI; *Lavorazioni plastiche dei metalli*; Edizioni Liguori.
- [4] S. ABDUL RAJAK, N. VENKATA REDDY; *Prediction of internal defects in plane strain rolling*; Kanpur, India;
- [5] PASQUINO, D. FIORILLO, C. SINAGRA, L. VESCIO; *La misura del crown nella laminazione a caldo di semilavorati in lega di alluminio AA8011: misurazione e ottimizzazione*. La Metallurgia Italiana - n. 11-12/2013.
- [6] DOUGLAS C. MONTGOMERY; *Controllo statistico della qualità*; McGraw Hill.
- [7] *Simufact forming reference manual ver. 11.0*
- [8] *Simufact forming user guide*
- [9] *MSC Marc Documentation vol B - Vol C*
- [10] *MSC Marc user guide*
- [11] DI LIU, ZUYAN LIU, LUMENG WANG; *Simulation of rolling process of AZ31 magnesium alloy sheet*; procedia engineering.
- [12] GIOVANNI STRAFELLINI, *Attrito e usura, metodologie di progettazione controllo*; Edizione Tecniche Nuove.
- [13] www.lamiazionesottile.com.
- [14] ww.mino.it Immagini del laminatoio ©Mino Spa